

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

CARACTÉRISATION DE LA DYNAMIQUE DE VENTILATION INTERNE  
D'UN TALUS D'ÉBOULIS

MONT HOG'S BACK, GASPÉSIE, QUÉBEC

MÉMOIRE DE MAÎTRISE  
EN GÉOGRAPHIE

PAR  
ALEXIS SAINT-PIERRE

DÉCEMBRE 2016

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL  
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

## REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tous ceux qui m'ont apporté leur aide, de près ou de loin, pour la réalisation de ce projet de recherche. Merci à Gautier Davesne, Isabelle de Grandpré, Stéphanie Coulombe, Michel Sliger et Jean-Philippe Martin pour leur soutien sur le terrain, leur support moral et pour les nombreux périples en Gaspésie. Merci également à Daniel Fortier, pour son temps et son aide logistique.

Merci à ma famille pour leur soutien continu tout au long de ma maîtrise. Un remerciement spécial à ma mère, qui par sa force de vivre et son courage, nous pousse continuellement à être meilleurs.

Finalement, merci à Daniel Germain, mon directeur de recherche, d'avoir cru en mes capacités et m'avoir partagé sa passion pour la géomorphologie.

## TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES .....	v
LISTE DES TABLEAUX .....	viii
RÉSUMÉ.....	ix
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I.....	6
REVUE DE LA LITTÉRATURE SCIENTIFIQUE .....	6
CHAPITRE II.....	18
RÉGION ET SITE À L'ÉTUDE.....	18
2.1. Description du site d'étude.....	18
CHAPITRE III .....	22
MÉTHODOLOGIE .....	22
3.1. Observations et cartographie .....	22
3.2. Épaisseur et porosité de la formation sédimentaire .....	23
3.2.1. Enfumage.....	23
3.2.2. Géoradar (radar géophysique) .....	24
3.3. Manteau neigeux .....	26
3.4. Cartographie des températures de surface.....	29
3.4.1. Images thermiques infrarouges.....	29
3.4.2. Mesures de la température du sol .....	29
CHAPITRE IV .....	33
RÉSULTATS .....	33
4.1. Indices thermiques.....	33
4.1.1. Images thermiques .....	33
4.1.2. Indices thermiques en continu .....	35
4.1.3. Température du sol dans la partie basse des talus d'éboulis (Secteur 1) .....	35



4.1.4. Température du sol dans la partie haute des talus d'éboulis (Secteurs 2, 3, 4)...	38
4.2. Indices visuels .....	43
4.2.1. Temps de résidence de l'air dans l'éboulis .....	52
4.3. Indices géophysiques.....	53
CHAPITRE V .....	58
DISCUSSION .....	58
5.1. Évidences visuelles de la ventilation hypogée .....	58
5.2. Comportement thermique.....	59
5.3. Impacts mutuels du processus de ventilation sur l'environnement .....	62
5.4. Méthodologie, mesures de terrain et limitation.....	64
CONCLUSION .....	66
BIBLIOGRAPHIE .....	68

## LISTE DES FIGURES

Figure		Page
Figure 1.1	Modèle de circulation d'air à l'intérieur d'un éboulis en régime hivernal et estival, illustrant l'asymétrie des zones de refroidissement hivernal et estival ainsi que la présence possible d'un pergélisol. Tao = température de l'air extérieur ; Tai = température de l'air à l'intérieur de l'éboulis (Source : Delaloye, 2004).....	15
Figure 2.1	Localisation du site d'étude (image Google Map 2015). ....	20
Figure 2.2	Versant est du mont Hog's Back et talus d'éboulis à l'étude (flèche noire) (photo 2012).....	21
Figure 2.3	Talus d'éboulis à l'étude (photo 2014).....	21
Figure 3.1	Prise de données avec le géoradar sur le versant du mont Hog's Back, décembre 2012. ....	26
Figure 3.2	Photo de gauche : caractérisation du manteau neigeux. Photo de droite : caractérisation des cristaux de neige, février 2012. ....	28
Figure 3.3	Cylindre utilisé pour l'évaluation de la densité du manteau neigeux, février 2012.....	28
Figure 3.4	Piquet utilisé pour l'installation des I-Buttons (flèche noire) sur les sites d'étude.....	31
Figure 4.1	Photographie thermique infrarouge. Gauche : secteur 2. Sur la photographie thermique, on peut voir les trappes d'air chaud (rouge) qui percent le sol et la mince couche de neige (bleu). On voit une personne en référence dans l'image (flèche noire). Droite : image réelle.....	34

Figure 4.2	Photographie thermique infrarouge. Gauche : sortie d'air chaud dans le secteur 2. On note une différence de 18,2 °C entre la sortie d'air chaud (rouge) et la neige (bleu). Droite : image réelle. ....	34
Figure 4.3	Localisation des secteurs investigués avec des capteurs thermiques. ....	35
Figure 4.4	Température du sol dans la partie basse du talus d'éboulis et température de l'air ambiant (secteur 1), de janvier 2012 à avril 2013. ....	37
Figure 4.5	Température du sol dans la partie haute du talus d'éboulis et température de l'air ambiant (secteur 2), de décembre 2012 à juin 2013. ....	40
Figure 4.6	Température du sol dans la partie haute du talus d'éboulis et température de l'air ambiant (secteur 3), de décembre 2012 à juin 2013. ....	41
Figure 4.7	Température du sol dans la partie haute du talus d'éboulis et température de l'air ambiant (secteur 4), de février 2012 à juillet 2012. ....	42
Figure 4.8	Photo de gauche : cristaux de givre à la sortie d'une trappe d'air chaud. Photo de droite : cristaux de givre recouvrant un arbuste près d'une trappe d'air chaud. ....	43
Figure 4.9	Mousse retrouvée dans le bas du talus d'éboulis près des sorties d'air froid. ....	44
Figure 4.10	Trous d'aspiration à travers le manteau neigeux, novembre 2012. ....	45
Figure 4.11	Photo de gauche : Coupe HG1 sur cailloux. Photo de droite : Coupe HG2 sur krumholtz. Février 2012. ....	46
Figure 4.12	Profils du manteau neigeux HG1 et HG2. ....	50
Figure 4.13	Profils du manteau neigeux HG3 et HG4. ....	51

Figure 4.14	Enfumage d'un trou d'aspiration à l'aide de fumigènes nautiques. Décembre 2012.....	52
Figure 4.15	Localisation des profils géoélectriques (lignes rouges) et localisation du secteur 2 investigué avec des capteurs thermiques (étoile orange).....	54
Figure 4.16	Profil géoélectrique LINE-1 effectué perpendiculairement à la pente et en amont du talus d'éboulis. ....	55
Figure 4.17	Profil géoélectrique LINE-2 effectué perpendiculairement à la pente et en aval du talus d'éboulis.....	56
Figure 4.18	Profil géoélectrique LINE-3 effectué au milieu du talus d'éboulis de l'amont vers l'aval. ....	57
Figure 5.1	Disposition en bande de la végétation sur le flanc est du mont Hog's Back (image Google Map 2015). ....	63

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 4.1	Profil de neige au mont Hog's Back, 2012. ....	48
Tableau 4.2	Couvert nival observé le long de trois transects, 2012.....	49

## RÉSUMÉ

De nombreuses anomalies thermiques causées par une ventilation interne ont déjà été observées à la surface de dépôts sédimentaires poreux à flanc de montagne. Les anomalies thermiques au sein d'un talus d'éboulis se manifestent dans la partie basse de l'éboulis en été et dans la partie haute en hiver. Des observations et des mesures de terrain effectuées au mont Hog's Back en Gaspésie (Québec), entre 2011 et 2014, ont montré un impact mutuel entre le processus de ventilation interne d'un talus d'éboulis et la végétation. Suite aux mesures effectuées sur le terrain (observations visuelles, relevé d'anomalies thermiques ponctuelles et continues, étude géoélectrique, profils de neige), une caractérisation du talus d'éboulis en milieu forestier a été produite. Plusieurs caractéristiques visibles dans la partie supérieure du talus corroborent la présence d'un processus de ventilation interne, à savoir une fonte hâtive et ponctuelle de la neige lors d'un faible couvert neigeux, des souffles d'air chaud, des phénomènes de condensation et de formation de givre aux droits des sorties d'air. Lors de la saison estivale, des courants d'air froid, un sol gelé et des plaques de neige résiduelle sont visibles. Une végétation azonale, caractérisée par des plantes arctiques-alpines, colonise généralement les secteurs affectés par la décharge gravitaire d'air froid. Les résultats montrent que la ventilation hypogée en milieu forestier est un phénomène complexe et fonction de plusieurs paramètres environnementaux, mais que la granulométrie et l'épaisseur des sédiments de surface ainsi que le gradient thermique entre l'intérieur et l'extérieur du talus d'éboulis sont sans contredit les facteurs les plus significatifs au mont Hog's Back.

**MOTS-CLÉS :** Talus d'éboulis, Ventilation, Anomalie thermique, Gaspésie

## INTRODUCTION

Plusieurs auteurs se sont attardés aux anomalies thermiques du sol reliées à une circulation interne de l'air dans un talus d'éboulis (Bertinelli *et al.*, 1993; Lismonde, 2001; Delaloye et Lambiel, 2005; Lambiel, 2006; Morard, 2011). On entend ici par talus éboulis une formation sédimentaire granulaire mise en place progressivement sur un versant suite au détachement de fragments depuis une paroi rocheuse (Francou et Hétu, 1989). Le profil longitudinal classique d'un éboulis présente un segment rectiligne dans la partie supérieure du versant et un segment concave dans la partie inférieure (Pérez, 1998). À cette concavité basale est généralement associé un granoclassement de l'amont vers l'aval, les fragments de grande taille étant susceptibles de parcourir une distance plus grande que les fragments de petite taille. De plus, Francou et Manté (1990) et Francou (1991) expliquent que la partie amont du versant est surtout affectée par des processus de déposition (chutes de pierres depuis la paroi rocheuse) et de transport de surface (angle de repos), tandis que la partie basale du talus est caractérisée exclusivement par l'accumulation de débris. L'éboulis présente une pente moyenne avoisinant 35°, laquelle peut toutefois être remodelée partiellement via divers processus géomorphologiques secondaires (solifluxion, gélifluxion, coulées de débris, avalanches de neige, etc.) (Francou et Hétu, 1989).

Selon la taille des dépôts granulaires, une masse d'air est présente dû à la porosité de l'éboulis (Gruber, 2005), ce qui entraîne une ventilation interne si les conditions nécessaires et adéquates sont présentes. Ce phénomène de ventilation est généralement associé à des conditions de température du sol sous la normale à la base des formations poreuses. Dans le cas des talus d'éboulis, ce phénomène est connu



sous le nom « d'éboulis froid ». Delaloye *et al.* (2003, p.13) propose la définition suivante pour un éboulis froid :

Formation sédimentaire poreuse se rencontrant à toute altitude et caractérisée par la présence d'une anomalie thermique négative (refroidissement) dans sa partie basse et d'une anomalie thermique positive (réchauffement) dans sa partie haute par rapport à la température moyenne annuelle de l'air. L'anomalie est causée par un mécanisme de circulation d'air interne (tube à vent, effet de cheminée).

Parmi les recherches effectuées sur les talus à basse altitude, la plupart font mention de la présence de pergélisol à la base de ces formations poreuses, et ce, même à plusieurs centaines de mètres sous la limite inférieure du pergélisol discontinu correspondant à l'isotherme de  $-1^{\circ}\text{C}$  (Delaloye *et al.*, 2007). Ces talus d'éboulis froids, comme Delaloye (2004) les nomme, vont donc servir de cadre théorique à notre recherche. Plusieurs conditions sont nécessaires à la mise en place d'un éboulis froid et, par conséquent, à un système de ventilation d'air interne. Suite à de nombreux relevés et observations sur le terrain, Delaloye (2004), Scapozza (2008), Morard (2011) sont parvenus à dresser une liste des critères essentiels à un système de ventilation interne, lesquels se résument à :

- une pente raide dont la déclivité minimale est de 20-25°;
- une partie basale de l'éboulis caractérisée par une épaisse couche (plusieurs mètres) de blocs grossiers, avec un diamètre minimal de 10 cm, et de nombreux vides;
- l'absence ou la quasi-absence de matériaux fins en surface;
- une paroi rocheuse abrupte ( $<40^{\circ}$ ) d'au moins 75 mètres de dénivelé en amont de l'éboulis;
- un sol mince, le cas échéant, pour limiter l'isolation thermique.



Les théories les plus courantes pour expliquer ces anomalies thermiques concernent le déficit d'ensoleillement, la ventilation sur un plan vertical (Balch effect) et horizontal (effet cheminée), l'effet isolant de la végétation et de la neige ainsi que le refroidissement lié aux processus d'évaporation estival et hivernal. Ces facteurs sont décrits et abordés dans le premier chapitre de ce mémoire, c'est-à-dire la revue de la littérature scientifique. La majorité des auteurs s'entend néanmoins pour dire que le processus principal de refroidissement d'une formation sédimentaire poreuse concerne la ventilation interne (e.g. Delaloye, 2004; Lambiel, 2006; Morard, 2011). Cependant, la plupart des études ayant été réalisées au sein d'éboulis de haute altitude (Delaloye, 2004; Delaloye et Lambiel, 2005; Lambiel, 2006), la relation entre le système de ventilation interne de l'éboulis et la végétation n'a que très peu été abordée. De plus, aucune recherche n'a été effectuée sur la dynamique d'un talus d'éboulis ventilé en milieu forestier; une lacune que nous avons cherché à combler partiellement à l'aide de cette étude.

Les observations réalisées sur les éboulis ventilés à basse altitude réfèrent majoritairement à la présence de pergélisol dans la partie inférieure du talus (Delaloye, 2004; Morard, 2011). En Gaspésie centrale, le mont Hog's Back dans la Réserve faunique des Chic-Chocs, se trouve à une altitude moyenne de 600 m, ce qui est largement en dessous de la limite altitudinale du pergélisol à l'échelle régionale. En effet, Gray et Brown (1982) estiment cette limite entre 1000 et 1100 m d'altitude, d'où la présence restreinte de pergélisol sur les plus hauts sommets comme le mont Jacques-Cartier (Gray *et al.*, 2009). La présence de pergélisol est donc très peu probable malgré la formation sédimentaire grossière et poreuse que présente les talus d'éboulis du mont Hog's Back. Il nous faut toutefois considérer, tel que mentionné précédemment, que la mise en place d'un système de ventilation interne favorise des anomalies thermiques négatives (refroidissement) et, sous certaines conditions, la

formation de pergélisol, et ce même sous la limite altitudinale du pergélisol discontinu.

À notre connaissance aucune étude scientifique poussée ne s'est intéressée aux interrelations entre la végétation et le système de ventilation d'un talus d'éboulis. Or, dans le contexte de basse altitude et de basse latitude de la Gaspésie, il est fort probable que la végétation joue un rôle primordial dans la dynamique de ventilation ou, à l'inverse, que la ventilation du talus d'éboulis influence de manière significative la végétation. À cet égard, nous postulons l'hypothèse à l'effet que le mont Hog's Back, particulièrement dans sa partie basale, présente un paysage forestier fragmenté redevable à un sur-refroidissement lié à la circulation d'air interne du talus d'éboulis. Pour valider cette hypothèse, une meilleure compréhension de la dynamique de ventilation hypogée au mont Hog's Back s'avère nécessaire. Cette recherche porte donc sur la dynamique d'un système de ventilation dans un talus d'éboulis en milieu forestier de basse altitude en Gaspésie centrale. Cette dynamique de ventilation dans les formations gravitaires grossières n'a que relativement peu été étudiée à ce jour, et aucune étude ne s'est encore attardée sur le système de ventilation d'un éboulis forestier en Gaspésie.

Les objectifs spécifiques poursuivis sont de : 1) caractériser d'un point de vue géomorphologique et sédimentologique la partie basse d'un des talus d'éboulis étudié; 2) quantifier et circonscrire dans le temps et l'espace les anomalies thermiques observées et; 3) évaluer l'impact de ces anomalies thermiques sur la végétation et vice-versa.

Ce travail est divisé en plusieurs chapitres dont une revue de la littérature scientifique au chapitre I. Dans le deuxième chapitre, la région et le site à l'étude sont présentés.

Dans le troisième chapitre, les méthodes utilisées sont décrites et suivies des résultats issus des travaux de terrain au chapitre IV. Le chapitre V présente une discussion sur le fonctionnement et les mécanismes souterrains de ventilation pour le site étudié.

## CHAPITRE I

### REVUE DE LA LITTÉRATURE SCIENTIFIQUE

Moins connue que certains autres processus souterrains, l'aérologie n'en demeure pas moins un phénomène complexe et déterminant du climat hypogé. Dans les grottes, il semble que la distribution de la température soit grandement contrôlée par les effets de la ventilation (Luetscher *et al.*, 2003). La présence d'anomalies thermiques dans les formations sédimentaires poreuses (i.e. glaciers rocheux, felsenmeers, talus d'éboulis) a aussi été observée depuis plusieurs siècles, mais n'a fait l'objet d'investigations scientifiques poussées que depuis peu (Delaloye, 2004; Lambiel, 2006). L'existence d'un système de ventilation interne dans certains talus d'éboulis semble être à l'origine du refroidissement observé. La majorité de ces études ont, cependant, porté sur des éboulis de hautes montagnes, bien au-dessus de la limite altitudinale de la végétation (Delaloye, 2004; Lambiel, 2006; Morard, 2011). Dans la littérature scientifique, on note toutefois quelques descriptions de talus d'éboulis avec la mention d'une végétation azonale et d'une température basse, voire de gel, sur des sites où la température est normalement bien au-dessus du point de congélation (Desaussure, 1796). Les théories les plus courantes pour expliquer cette anomalie thermique concernent le déficit d'ensoleillement (Rist *et al.*, 2003; Hoelzle et Haeberli, 1995), l'effet isolant de la végétation (Delaloye et Reynard, 2001) et de la neige (Wakonigg 1996, Harris et Pedersen, 1998), le refroidissement lié aux processus d'évaporation estivale et hivernale (Delaloye, 2004; Morard, 2011) ainsi que la ventilation sur un plan vertical (Balch effect) (Harris et Pederson 1998; Hoelze *et al.*, 2010) et horizontal (effet cheminée) (Lambiel, 2006; Delaloye, 2007).

Lors d'un changement de phase de l'eau, des quantités considérables de chaleur sont mises en jeu pour refroidir ou réchauffer l'environnement ambiant (Morard, 2011).



Dans le cas de l'évaporation (liquide/gazeuse) et de la sublimation (solide/gazeuse), on note un refroidissement. La glace, à titre d'exemple, va absorber une quantité importante de chaleur en fondant, maintenant ainsi l'environnement immédiat dans un état de fraîcheur relative. L'hypothèse de l'évaporation estivale fut ainsi proposée par de nombreux auteurs (Sawada, 2003; Delaloye, 2004; Morard, 2011) pour expliquer une anomalie thermique négative du sol à certains endroits. De Saussure en fait mention le premier en 1796, prétendant que la force réfrigérante de l'évaporation dans un environnement hypogé permet d'abaisser la température de l'air interne par comparaison aux conditions atmosphériques extérieures. Sur la base d'expériences réalisées, ce processus expliquerait un refroidissement de l'ordre de 3°C, mais serait insuffisant pour justifier les anomalies thermiques de 7 et 8°C observées. De Saussure ajoute une objection à cette théorie, à savoir :

Si l'air renfermé dans ces cavernes était déjà humide, s'il était saturé d'humidité, il ne pourrait point produire d'évaporation, et par conséquent point de froid.

Un courant d'air à saturation, équivalent au courant d'air estival sortant et observé dans la partie basse de certains éboulis en Suisse, ne peut en théorie produire davantage d'évaporation (Law et Vandijk, 1994). Delaloye (2004) mentionne que s'il y a sublimation de l'humidité (ou de la glace) du sol en profondeur, elle se produit durant l'hiver lorsque l'air froid s'introduit dans l'éboulis. Au cours de l'été, on retrouve plutôt une condensation de la vapeur d'eau contenue dans l'air chaud qui pénètre dans le milieu froid de l'éboulis.

La plupart des auteurs critiquent fortement l'idée d'un refroidissement majeur causé par l'évaporation estivale, mais admettent tout de même que des processus de fonte, d'évaporation et de sublimation peuvent avoir lieu durant l'été suite à l'accélération

du courant d'air (e.g. Delaloye, 2004; Delaloye *et al.*, 2007; Lambiel, 2006; Morard, 2011). Ce phénomène serait d'ailleurs à l'origine des variations secondaires de la température du sol, en particulier les faibles baisses de la température enregistrée lors des journées de grande chaleur. Les processus de changement de phase de l'eau dans les milieux hypogés demeurent toutefois difficiles à étudier. Quoique ces derniers semblent affecter le régime thermique des environnements sédimentaires poreux dans une moindre mesure, leur mode de fonctionnement et leurs effets réels n'ont jamais pu être démontrés clairement (Delaloye *et al.*, 2007). Cependant, on sait que le passage d'un courant d'air, dont les propriétés thermiques et hydriques sont différentes du milieu hypogé traversé, est à l'origine de processus d'évaporation et de condensation (Delaloye 2004; Delaloye *et al.*, 2007; Morard 2011). Ce sont d'ailleurs la nature et l'intensité de ces processus qui expliqueraient, en partie du moins, la présence de pergélisol ponctuel sous sa limite altitudinale de distribution dans certains talus d'éboulis (Lambiel, 2006; Delaloye *et al.*, 2007).

Une des premières hypothèses pour expliquer la présence de pergélisol sporadique à basse altitude, en région montagneuse, consiste au fait que le rayonnement solaire est extrêmement réduit (Rist *et al.*, 2003; Hoelzle et Haeberli, 1995). Ainsi, l'ombre produite par les parois rocheuses surplombantes engendre une baisse locale du bilan radiatif, ce qui influence directement la température de la surface du sol (Bertinelli *et al.*, 1993; Rist *et al.*, 2003). Scapozza *et al.* (2008) ont d'ailleurs noté une tendance dans l'orientation des glaciers rocheux (actifs, inactifs ou fossiles) présents dans Alpes Tessinoises orientales. En revanche, ce bilan radiatif ne parvient pas à expliquer le sur-refroidissement de la partie basse de certains éboulis et l'apparition d'anomalies thermiques. Comme proposé par Lambert (1967), Molenda (1996) et Wakonnig (1996), et démontré sur le terrain par Ruzicka (1999), Delaloye (2004) et Morard (2011), la présence d'éboulis froids est indépendante de l'orientation et n'est pas limitée aux versants peu ensoleillés. Kneisel *et al.* (2000) expliquent néanmoins

la présence d'une mince couche de glace sur un versant sous la limite des arbres par une radiation thermique réduite, tandis que Farbrot *et al.* (2008) mentionnent qu'au nord de la Norvège, la radiation solaire serait l'un des deux principaux facteurs de contrôle du régime thermique des sites enneigés. Le second facteur serait la présence ou l'absence de champs de blocs.

La présence de végétation (arbustes et mousses) protège la surface du sol du réchauffement estival (Delaloye *et al.*, 2007). Delaloye et Reynard (2001) ont montré que la strate arbustive composée d'épicéas nains absorbait ou réfléchissait jusqu'aux deux tiers du rayonnement solaire incident lors des belles journées estivales, c'est à dire suivant la disparition de la neige. Le gradient entre la température au-dessus de la strate arbustive et celle mesurée au sol était d'autant plus grand que les journées étaient ensoleillées et chaudes. Les mousses font aussi office d'excellents isolants thermiques. Une différence thermique de 30°C a déjà été relevée entre la surface et la base d'un tapis de mousse lors d'une journée chaude et ce, sur quelques centimètres seulement (Delaloye, 2004). D'ailleurs, Sawada (2005) mentionne que le pergélisol est présent où les sphaignes abondent sur les éboulis japonais, témoignant une fois de plus du pouvoir thermique isolant de la végétation basse. Cet effet « parasol » que la végétation apporte à un éboulis ne peut cependant pas être considéré comme le facteur principal de refroidissement du sol, même si ce dernier contribue à maintenir des conditions pédoclimatiques fraîches (Delaloye, 2004; Morard, 2011). En somme, de nombreux éboulis froids caractérisés par l'absence, ou presque, de végétation existent à basse et moyenne altitude (Morard 2011), sans compter les nombreux exemples d'un système de ventilation dépourvu de végétation et retrouvé à haute altitude (Lambiel, 2006).

En raison de sa faible capacité de transfert d'énergie (conductivité thermique), la neige agit aussi comme isolant en bloquant la circulation d'air entre le sol et l'atmosphère (Wakonigg, 1996; Harris et Pedersen, 1998; Hoelzle *et al.*, 1999). Par contre, selon Delaloye (2004) et Delaloye et Lambiel (2005), la neige est un matériau poreux à travers lequel l'air peut circuler. Ainsi, l'aspiration d'air froid est possible malgré la présence d'un épais manteau neigeux. Les flux de chaleur à travers le couvert de neige se produisent par conduction et convection (Albert et Hardy, 1995; Hoelzle *et al.*, 1999; Gruber et Hoelzle, 2001; Delaloye, 2004; Delaloye *et al.*, 2007). Bernard *et al.* (1998) et Scapozza (2008) ajoutent que des tunnels d'air chaud ont été observés au travers du manteau neigeux au long de petites dépressions à la surface d'un glacier rocheux. Ces tunnels feraient office d'évacuateur d'air chaud de la couche active, et réduiraient ainsi son effet isolant. De plus, les études de Gruber et Hoelzle (2008) et de Harris et Pedersen (1998) montrent que le réchauffement du sol provoqué par le couvert de neige dans les zones de blocs détritiques grossiers peut être réduit d'un ou plusieurs degrés par effet de conduction. Toutefois, le comportement thermique lié au manteau neigeux reste complexe et l'importance des transferts d'énergie au sein de ce dernier reste incertaine et difficilement quantifiable (Hoelzle *et al.*, 1999; Delaloye 2004).

Tous s'accordent cependant pour dire que la présence ou l'absence d'un manteau neigeux joue un rôle dans la préservation et la formation du pergélisol (Bernard *et al.*, 1998; Hoelzle *et al.*, 1999, 2001; Delaloye *et al.*, 2007; Harris *et al.*, 2009). En effet, un enneigement tardif permet de refroidir fortement le sol au début de l'hiver, tandis qu'un enneigement hâtif limite le refroidissement du sol. Au printemps et en été, les secteurs où perdure le manteau neigeux sont protégés du rayonnement solaire. La mise en place du couvert de neige ainsi que sa redistribution par le vent et les avalanches jouent donc un rôle important sur les caractéristiques thermiques de la surface du sol et du pergélisol, le cas échéant (Lerjen *et al.*, 2003; Heggem *et al.*,



2005; Riseborough, 2005), notamment dans les régions de hautes montagnes (Delaloye et Monbaron, 2003). Le régime d'enneigement-déneigement est donc un élément essentiel à l'étude et la compréhension de la dynamique thermique des formations sédimentaires poreuses (Delaloye *et al.*, 2007).

Les processus présentés jusqu'ici (refroidissement par évaporation et condensation, déficit d'ensoleillement, effet parasol de la végétation, effet isolant du manteau neigeux) contribuent sans aucun doute au régime thermique des milieux hypogés poreux. Cependant, aucun de ces processus n'explique avec satisfaction les anomalies thermiques retrouvées dans ces milieux. C'est donc à travers l'étude de la circulation d'air à l'intérieur du milieu hypogé que la majorité des auteurs s'entendent pour expliquer les anomalies thermiques présentes et ce, même à basse altitude. Selon Massen *et al.* (1998), les courants d'air dans un environnement hypogé sont provoqués par de nombreux facteurs : une différence de température, le vent extérieur, un changement de la pression atmosphérique, l'entraînement de l'air par des circulations d'eau ou par un changement du volume de la cavité lorsqu'elle est inondée, etc. Ces différents facteurs sont présentés brièvement ci-dessous afin de relever leur importance sur le ou les mécanismes de ventilation.

Lismonde (2002b) mentionne que la plupart des courants d'air sont d'origine thermique. Ils sont créés par effet de cheminée dans les cavités à entrées multiples ou par des cellules locales de convection souterraine générées par une différence de température. L'effet de cheminée s'explique par la poussée d'Archimède, où l'air froid, dont la masse volumique est plus grande que l'air chaud, progresse vers le bas. L'appel d'air de la cheminée est d'autant plus fort que la différence thermique est élevée et que la cheminée est haute (i.e. l'importance du dénivelé entre les deux entrées) (Luetscher et Jeannin, 2004b; Delaloye *et al.*, 2007). La présence ou

l'absence de vent extérieure n'influence que très peu le mécanisme de ventilation interne. Il peut cependant créer des surpressions et des cisaillements au voisinage des orifices (Lismonde, 2002b). De plus, les vents soufflants directement dans une cavité peuvent aussi affecter la température en forçant l'air extérieur dans le système (Smithson, 1991). Dans ce cas, l'entrée de la cavité doit se trouver dans l'axe des vents dominants.

Dans une grotte, des masses d'air peuvent être mises en mouvement lors de crues inondant le réseau hydrographique souterrain. Une crue fait également monter le niveau piézométrique, réduisant ainsi le volume d'air dans la grotte. La surpression qui s'en suit provoque une expulsion de l'air (Luetscher et Jeannin, 2004; Luetscher et Jeannin, 2004b; Delaloye *et al.*, 2007). Des fluctuations de la pression atmosphérique peuvent aussi entraîner des mouvements d'air dans les grottes de grand volume (Luetscher et Jeannin, 2004b; Delaloye, 2004; Morard, 2011). Contrairement à la circulation produite par une différence thermique, ce mécanisme est un phénomène périodique et non saisonnier, généralement synchrone avec les variations de la pression atmosphérique (Massen *et al.*, 1998).

Lorsqu'au sein d'un dépôt sédimentaire poreux on note plusieurs entrées, une advection et une convection libre d'air peuvent être observées en raison d'une différence de température, et donc de densité, entre l'intérieur et l'extérieur de la formation (Lismonde, 2002b; Luetscher *et al.*, 2003; Luetscher et Jeannin, 2004b; Delaloye *et al.*, 2007). L'intensité et la direction (ascendante ou descendante) du courant d'air varient en fonction de la saison et de l'amplitude de l'écart de température. C'est le principe du tube à vent ou effet de cheminée. Fréquemment étudié dans les cavités souterraines, ce mécanisme s'applique également aux éboulis.

Lorsque présent dans un éboulis, ce dernier porte le nom d'éboulis froid, dont la définition est la suivante selon Delaloye *et al.* (2007, p.13) :

Formation sédimentaire poreuse se rencontrant à toute altitude et caractérisée par la présence d'une anomalie thermique négative (refroidissement) dans sa partie basse et d'une anomalie thermique positive dans sa partie haute (réchauffement) par rapport à la température moyenne annuelle de l'air.

On distingue généralement deux phases principales dans un système d'éboulis froid : le régime hivernal (ascendant) et le régime estival (descendant). En régime hivernal, lorsque la température de l'air à l'extérieur est plus froide que l'air à l'intérieur, on observe une ascension de l'air à l'intérieur de la formation sédimentaire puisque celle-ci est plus légère (plus chaud, donc moins dense). Cette montée d'air chaud produit une dépression dans la partie basse de l'éboulis et une zone de haute pression dans la partie supérieure de l'éboulis (Luetscher et Jeannin, 2004b; Guodong *et al.*, 2007; Morard, 2011). Le mécanisme entraîne l'air extérieur (froid) vers l'intérieur de l'éboulis par des trous d'aspiration situés dans la partie basse, permettant ainsi d'emmagasiner un réservoir d'air froid. Les blocs composant l'éboulis et les terrains non poreux sous-jacents et adjacents vont emmagasiner par conduction le froid apporté par le courant d'air (Lilleøren *et al.*, 2012). Le phénomène d'aspiration peut aussi opérer avec la présence d'un couvert neigeux de 1 à 3 mètres d'épaisseur (Delaloye, 2004; Delaloye et Lambiel, 2005). L'éboulis profite donc de toutes les périodes froides de l'hiver pour se refroidir sous le point de congélation et le processus est particulièrement efficace lors des vagues de grand froid (Delaloye et Lambiel, 2005).

En régime estival, lorsque l'air extérieur de la formation est plus chaud qu'à l'intérieur, un écoulement gravitaire de l'air froid va se produire dans l'éboulis (Delaloye et Lambiel, 2005; Delaloye *et al.*, 2007; Morard 2011). Cela favorise la

préservation des températures froides accumulées durant l'hiver à la base de la formation poreuse et ce, malgré la chaleur de l'été. En contrepartie de cette décharge gravitaire, de l'air chaud est aspiré – probablement de façon diffuse – dans la partie amont de l'éboulis (Delaloye *et al.*, 2007). La réversibilité du système s'effectue en fonction d'un seuil thermique dépendant de la période de l'année et de la différence entre la température interne générale de l'éboulis par rapport à la température extérieure (Delaloye et Lambiel, 2005; Delaloye *et al.*, 2007). Les périodes de réversibilité du système de ventilation dans un éboulis sont toutefois très complexes et peu d'études se sont attardées sur le sujet (Delaloye et Lambiel, 2005). Les indices visuels ou évidences d'un système de ventilation actif dans un éboulis peuvent varier en fonction de l'altitude, de l'orientation, de la composition du sol et de la nature de l'éboulis. Ces facteurs déterminent la température moyenne accumulée par la formation sédimentaire et le seuil thermique d'inversion du phénomène de ventilation (Delaloye et Lambiel, 2005). Bien que la section basse d'un éboulis ventilé représente un milieu froid et ce, autant lors du régime hivernal que lors du régime estival, il existe néanmoins un décalage spatial entre la zone de refroidissement maximale dans les deux régimes (Morard, 2011). L'écoulement gravitaire estival s'évacue de préférence au point le plus bas de l'éboulis, tandis que l'aspiration d'air froid durant l'hiver s'étend dans les zones les plus élevées du talus (figure 1.1) (Delaloye, 2004). Il convient aussi de mentionner que les talus d'éboulis à granulométrie fine seront soumis à des conditions rhéologiques, de saturation et de formation de glace très particulière et fort différentes de celles observés dans les éboulis grossiers, ce qui influence sans contredit le processus de ventilation interne du talus (Lambiel, 2002b; Scapozza et Lambiel, 2012).



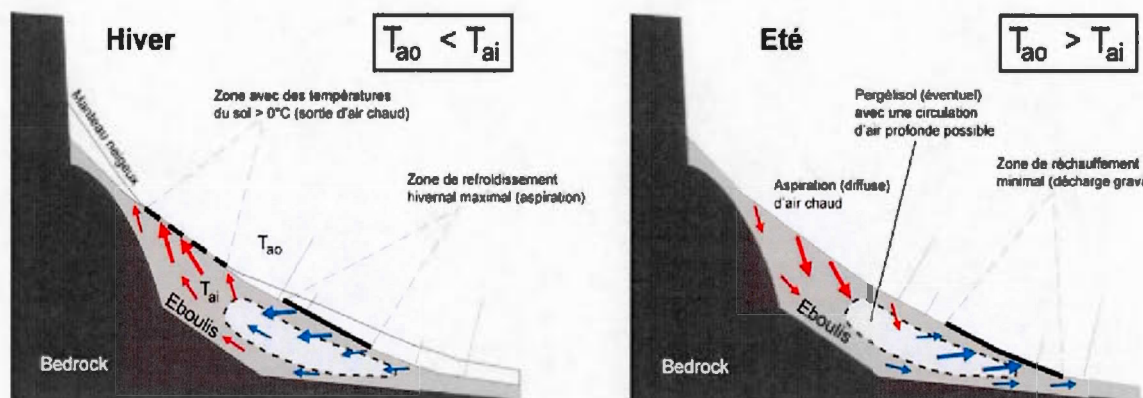


Figure 1.1 Modèle de circulation d'air à l'intérieur d'un éboulis en régime hivernal et estival, illustrant l'asymétrie des zones de refroidissement hivernal et estival ainsi que la présence possible d'un pergélisol.  $T_{ao}$  = température de l'air extérieur ;  $T_{ai}$  = température de l'air à l'intérieur de l'éboulis (Source : Delaloye, 2004).

La plupart des courants d'air étudié dans les éboulis sont à l'origine d'un déséquilibre thermique entre l'intérieur et l'extérieur du système. Par contre, il existe plusieurs modes de circulation dont la variabilité s'explique par deux paramètres principaux : le nombre d'entrées du système et le dénivelé entre ces entrées (Luetscher et Jeannin, 2004b; Morard, 2011). Ces modes de fonctionnement ont souvent été décrits lors d'études sur les cavités souterraines (Luetscher et Jeannin, 2004; Morard, 2011).

Dans les formations sédimentaires poreuses, le nombre d'entrées d'air est multiple, puisque chaque interstice à la surface du sol représente une entrée. Les modèles de circulation en piège à air ne peuvent donc pas être considérés. Dans le cas des éboulis froids, le dénivelé et la pente entre les parties inférieures et supérieures de la formation seraient les principaux facteurs responsables de la circulation d'air. Dans cette perspective, la circulation d'air par effet de cheminée (ou tube à vent) serait le processus dominant dans les éboulis (Delaloye, 2004; Delaloye et Lambiel, 2005; Lambiel, 2006; Morard, 2011; Scapozza, 2012). Lors d'expériences sur des remblais,

Guodong *et al.* (2007) ont identifié deux types de circulation d'air selon la pente. Le premier, qui agit sur les remblais fermés (ou imperméables) et sur les remblais ouverts disposés horizontalement, donc à faible pente, le refroidissement est attribué à une convection de type Rayleigh-Bénard, caractérisée par de multiples cellules de convection. Dans le cas des remblais ouverts et inclinés entre 15 et 80°, se sont à la fois l'effet cheminée et la convection induite par les vents dominants qui agissent comme processus dominants. Selon Ruzicka (1999), une inclinaison minimale de 25° est nécessaire dans un éboulis pour que la circulation d'air soit efficace et favorise le refroidissement du sol. Tel que mentionné précédemment, l'appel d'air associé à l'effet cheminée est d'autant plus fort que la différence thermique est élevée et que le dénivelé entre les deux entrées est important. Le moteur de la circulation d'air par effet de cheminée est donc calculé par le gradient de pression motrice (Guodong *et al.*, 2007; Morard, 2011). En considérant l'absence de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère de la cavité, Lismonde (2002a) et Luetscher (2005) sont parvenus à calculer ce gradient de pression. La porosité et la friction ne sont toutefois pas prises en compte, ce qui doit nécessairement être le cas lors d'études portant sur un courant d'air à l'intérieur d'un éboulis (Luetscher et Jeannin, 2004).

En ce qui concerne les milieux sédimentaires poreux à très faible pente, soit les felsenmeers (champs de blocs) ou la surface d'un glacier rocheux actif, la mise en place d'une ventilation est possible, mais ne s'opère pas sur l'ensemble de la formation contrairement à ce qu'on retrouve dans les milieux poreux à plus forte déclivité. Cette ventilation s'effectue sur la partie supérieure de la formation et opère par l'entremise de petites cellules de convection, aussi appelée « Balch Effect » (Balch, 1900; Harris et Pederson, 1998; Hoelze *et al.*, 2010). Ce type de convection fait référence à la convection de type Rayleigh-Bénard (Guodong *et al.*, 2007). Lilleøren *et al.* (2012) ajoutent que les champs de blocs, dus à leur capacité de transport et de stockage d'air dans les interstices, sont des milieux propices à ce type

de ventilation. Bien que moins efficace que l'effet cheminée, la circulation d'air dans les champs de blocs grossiers peut abaisser la température du sol de façon significative (Fabrot *et al.*, 2008; Gislås, 2011; Morard, 2011).

En somme, les facteurs de refroidissement d'un milieu poreux sont nombreux, mais n'affectent l'environnement que de façon secondaire pour la plupart via l'évaporation estivale et hivernale, le bilan radiatif, l'effet « parasol » de la végétation et la faible conductivité thermique du couvert de neige. La majorité des auteurs s'accorde pour dire que le refroidissement des milieux sédimentaires poreux est conditionnel à un système de circulation d'air à l'intérieur du dépôt engendré par un déséquilibre thermique. On distingue ainsi deux types de circulation d'air. Le premier, se déroulant dans les terrains en pente forte (talus d'éboulis et glaciers rocheux), correspond à une cellule unique de convection qui affecte l'ensemble de la formation (effet cheminée). Le second, dont l'occurrence est manifeste sur des terrains à faible déclivité comme les felsenmeers, consiste à plusieurs petites cellules de convection, lesquelles agissent sur la partie superficielle du dépôt.

## CHAPITRE II

### RÉGION ET SITE À L'ÉTUDE

Le site du mont Hog's Back a fait l'objet, en 2011, d'une visite sommaire au cours de laquelle la présence d'anomalies thermiques, reliées probablement à un système de ventilation actif à l'intérieur d'un talus d'éboulis situé sur le flanc est de la montagne, a été relevée.

#### 2.1. Description du site d'étude

Situé en Gaspésie centrale, le mont Hog's Back fait partie des monts Chic-Chocs, à près de 40 km du littoral nord de la péninsule gaspésienne et à 5 km au sud du plateau du mont Albert (figure 2.1). Culminant à environ 830 m d'altitude, le mont Hog's Back constitue une crête orientée nord-sud qui s'étend sur près de 2 km (figure 2.2). Il correspond à une intrusion granitique datée du Dévonien (Doyon et Valiquette, 1991; Brisebois et Brun, 1994; D'Hulst, 2007).

Le couvert forestier sur la montagne est dominé par les sapins baumier (*Abies balsamea* (L.) Mill.), soit une végétation typique de la région à la même altitude. Plus localement, on retrouve des mousses et des lichens s'apparentant à de la végétation alpine, notamment au sommet et dans le bas de certains talus d'éboulis.

Plusieurs talus d'éboulis découpent d'ailleurs le paysage forestier sur le flanc du mont Hog's Back. Ces talus d'éboulis sont composés de cailloux granitiques, dont les clastes sont d'ordre décimétrique. Les talus à l'étude se trouvent plus précisément sur le versant est de la montagne (figure 2.3), avec une quasi-absence de paroi rocheuse



sommitale à cet endroit. Ce versant est le plus abrupt de la montagne et l'on y retrouve deux couloirs d'avalanche incisés dans le paysage. Ce versant est d'ailleurs de plus en plus prisé par les skieurs hors-piste de la région. Les deux principaux couloirs d'avalanche du mont Hog's Back ont un intervalle de retour des gros événements à tous les trois ans (Boucher et al, 2003; Germain *et al.*, 2009). Les avalanches comptent parmi les mouvements gravitaires influençant la dynamique des populations végétales ainsi que la distribution de la neige sur le versant (Johnson, 1987; Boucher *et al.*, 2003; Germain et Fortin, 2011).

Au niveau du climat, la température moyenne annuelle passe de +0,3 °C vers 550 m d'altitude à -4 °C sur les hauts sommets à 1100-1200 m (Gray et Brown, 1979, 1982). Les précipitations annuelles varient entre 1100 et 1600 mm, dont 40% tombent sous forme de neige, et on y retrouve une nébulosité moyenne qui dépasse les 70% (Gagnon, 1970). Les Chic-Chocs comptent d'ailleurs parmi les régions les plus humides du Québec.

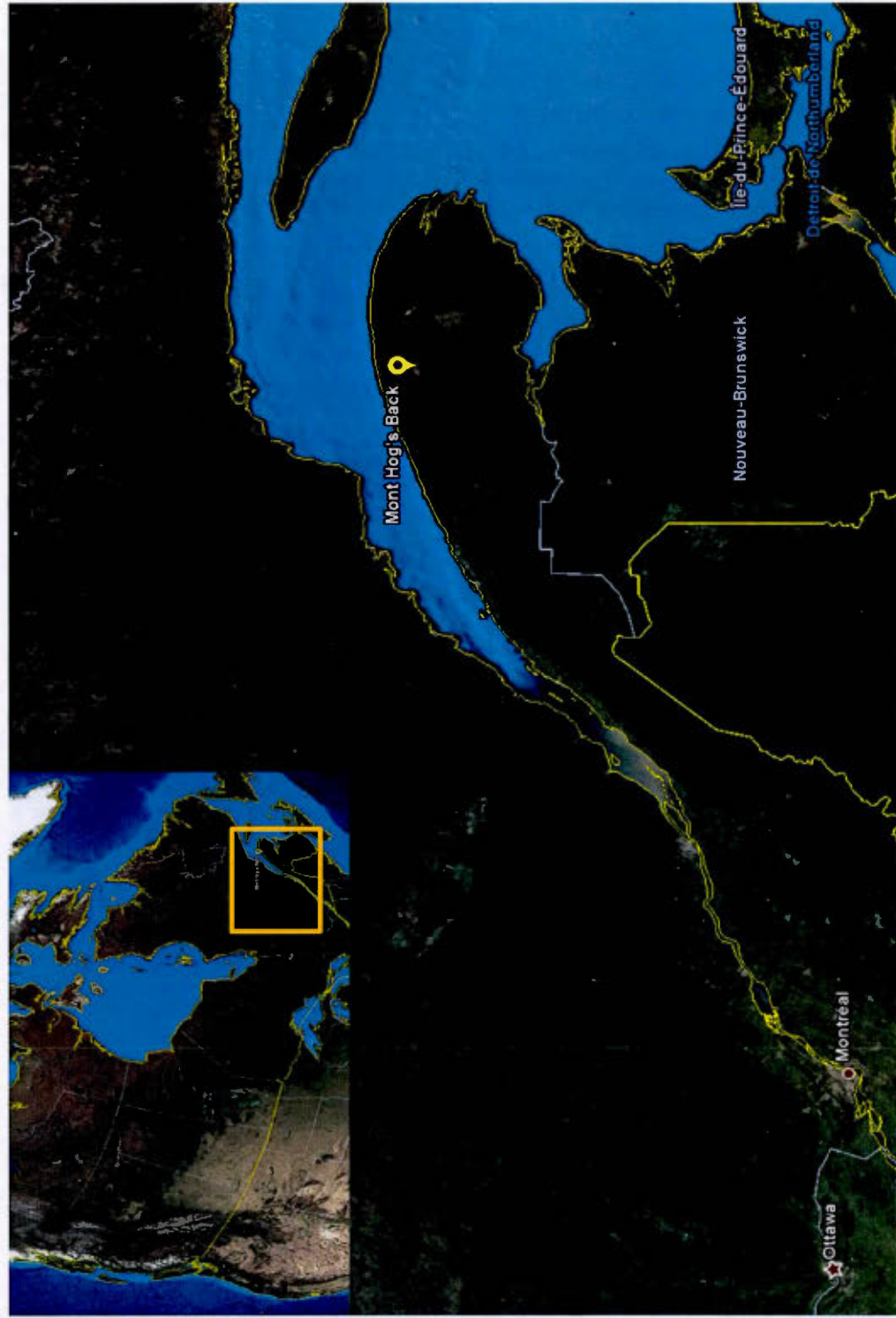


Figure 2.1 Localisation du site d'étude (image Google Map 2015).

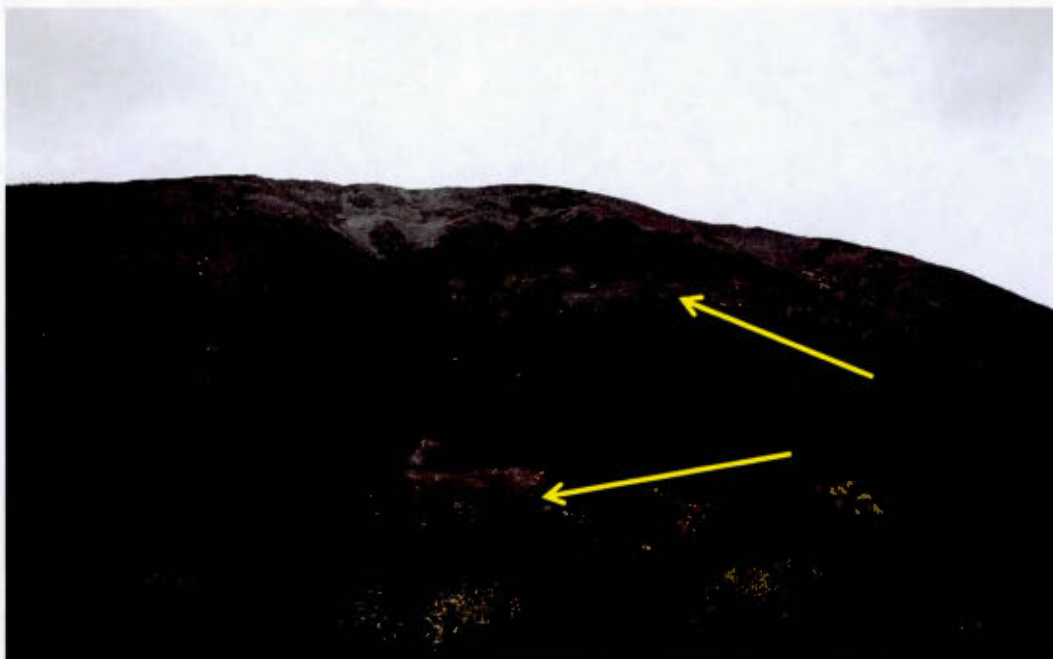


Figure 2.2 Versant est du mont Hog's Back et les talus d'éboulis à l'étude en haut et en bas de versant (flèches jaunes) (photo 2012).



Figure 2.3 Talus d'éboulis à l'étude en bas de versant (photo 2014).

### CHAPITRE III

#### MÉTHODOLOGIE

Afin de bien cerner l'objectif principal de cette recherche, nous avons procédé à une caractérisation complète du talus d'éboulis pour bien comprendre les mécanismes en présence. L'observation et la prise de mesure instantanées nous ont tout d'abord permis d'avoir une première approche des phénomènes en place. De nombreuses méthodes ont par la suite été testées et utilisées dans le cadre de cette étude afin d'améliorer la compréhension des phénomènes de circulation d'air hypogé. Ainsi, une caractérisation du manteau neigeux, l'enregistrement en continu de la température du sol et la prospection géoélectrique ont été par la suite réalisés sur le site. Les méthodes ont été utilisées sur une période s'échelonnant de la fin 2011 à l'été 2014.

#### 3.1. Observations et cartographie

Des visites de terrain ont été effectuées entre 2011 et 2012 afin d'observer les différents phénomènes liés à un système de ventilation hypogé ainsi que pour caractériser le talus d'éboulis. Ce travail, fait dans un premier temps, a permis de localiser les secteurs intéressants où des méthodes plus poussées (en temps et en matériel) ont été effectuées par la suite.

Lors de ces visites, la température du sol et des courants d'air a été mesurée à l'aide d'un thermomètre digital de poche (JT-650, précision +/- 0,3 °C) et de nombreuses photographies ont été réalisées sur l'ensemble du site à l'étude. Chaque mesure de donnée a fait le suivi d'une localisation GPS (Garmin etrex, d'une précision de 5 à 10 m) et d'une description du secteur afin de bien situer les données.



Cette première étape a permis d'identifier trois secteurs clés sur le versant du mont Hog's Back, soit un talus d'éboulis en bas de versant, un talus d'éboulis en haut de versant et un dernier en bordure de la route. Le site en bas de versant semblait le plus prometteur avec l'observation de plusieurs signes témoignant de la présence d'une ventilation interne, soit des températures anormales et de la végétation atypique. Un plus grand effort a donc été déployé pour caractériser ce secteur avec notamment l'enregistrement en continu de la température du sol et la prospection géoélectrique. Les deux autres secteurs ont aussi fait l'objet d'un enregistrement de la température en continu, mais avec une ampleur moindre.

### 3.2. Épaisseur et porosité de la formation sédimentaire

#### 3.2.1. Enfumage

La technique d'enfumage consiste à injecter une certaine quantité de fumée colorée à l'endroit de l'entrée d'air (aspiration) du talus ventilé et observer combien de temps avant que celle-ci réapparaisse à la sortie d'air. Cela permet de calculer le temps de résidence de l'air dans le talus et de déterminer l'efficacité du système de ventilation. En se basant sur le courant d'air au sein de différents trous à vent, Dorthé et Morard (2007) ainsi que Morard (2011) ont émis l'hypothèse que le temps de résidence d'une particule d'air dans un éboulis ventilé est relativement court, soit de l'ordre d'environ une heure pour une formation poreuse longue de 200 m. Mais aucune étude ne relate la technique d'enfumage, laquelle pourrait amener des précisions sur le temps résidence. Notre but était à ce moment de tester la méthode et de déterminer son efficacité. Dans ce contexte, deux fumigènes nautiques ont été utilisés pour l'essai et injectés dans l'entrée d'air à la base du talus d'éboulis en bas de versant en décembre 2012 (régime de circulation d'air hivernal).

### 3.2.2. Géoradar (radar géophysique)

Les propriétés physiques d'un talus, telles que l'épaisseur et la géométrie des dépôts sédimentaires, peuvent être estimées par la méthode géoélectrique à l'aide d'un géoradar (Ground Penetrating Radar, GPR) (Monnier *et al.*, 2009; Morard, 2011). Il s'agit d'un procédé rapide et efficace à mettre en œuvre sur le terrain et qui consiste à déterminer le temps de propagation et de réflexion d'ondes électromagnétiques de haute fréquence dans le sol (Reynard *et al.*, 1999; Ramelli *et al.*, 2011). Le temps de propagation et de réflexion des ondes est fonction de la nature du dépôt en place, de la porosité, de la compacité, de la teneur en eau, etc. (Haeberli, 1985).

Il est généralement facile de réaliser des mesures de propagation électrique et d'obtenir des résultats. L'interprétation de ceux-ci est cependant beaucoup plus hasardeuse si elle n'est pas combinée avec d'autres méthodes géophysiques, ou mieux encore, avec les propriétés physiques du sol obtenues lors d'un forage.

La méthode du géoradar a été utilisée pour déterminer la profondeur de l'interface entre le dépôt poreux du talus d'éboulis et le dépôt et la roche sous-jacente au droit du talus en bas de versant. L'objectif était ici de connaître l'épaisseur du talus afin de déterminer sa capacité à fournir un système de ventilation interne efficace. Nous avons été en mesure de comparer nos données géophysiques à celles d'une coupe stratigraphique réalisée au pied du même talus, bien que la coupe soit de faible profondeur (1,2 m à partir de la surface du talus). D'inévitables interrogations demeurent cependant concernant la nature exacte des dépôts.

Le principe du GPR consiste à envoyer une impulsion électromagnétique par une antenne transmetteur et de mesurer le temps de retour de l'onde par une deuxième

antenne récepteur. Le voyage de l'onde est influencé par la permittivité diélectrique des matériaux réfléchis, dont les valeurs varient de 1 (air) à 80 (eau) (Monnier *et al.*, 2009). Une forte teneur en eau du matériel va donc tendre à atténuer le signal. Les mesures avec un GPR sont alors préférables en période sèche ou dans les terrains perméables (comme les talus d'éboulis). La profondeur et la résolution de l'investigation dépendent de la fréquence utilisée avec les antennes. Une basse fréquence va permettre une investigation en profondeur avec une résolution moindre, tandis qu'une haute fréquence va augmenter les détails de l'investigation, mais seulement dans les couches superficielles.

Chaque couche distincte de sol traversée et réfléchi par l'onde peut donner un signal différent les uns des autres. En réalisant ces mesures le long d'un transect à la surface du sol, on obtient un profil longitudinal de la permittivité diélectrique du sol, qui sera ensuite traduit en profondeur. La technique consiste à envoyer des impulsions en se déplaçant sur le terrain tout en conservant la même distance entre les électrodes. Les mesures s'effectuent à des intervalles réguliers le long d'une ligne droite afin de reproduire un profil représentatif. Il est important de mentionner qu'un bon contact avec les antennes et le sol est primordial afin d'obtenir des mesures fiables. Dans le cas contraire, les propriétés de l'air influenceraient la prise de données.



Figure 3.1 Prise de données avec le géoradar sur le versant est du mont Hog's Back, décembre 2012.

Le matériel utilisé dans le cadre de cette étude est un GPR de marque Sensors et Software Inc. de type pulseEKKO PRO muni d'un ordinateur intégré traitant les données instantanément (figure 3.1). Des antennes de fréquences de 50 MHz ont été utilisées afin d'obtenir une bonne résolution sur une dizaine de mètres dans un matériau poreux. Lors de la prise des données, une impulsion a été envoyée à tous les mètres le long d'un profil. Au total, trois profils longitudinaux de la vitesse de propagation électrique du sol ont été effectués sur le talus d'éboulis. Ces mesures ont été réalisées en décembre 2012 alors qu'une couche de 5 à 15 cm de neige était présente à la surface du talus. Un de ces profils a été effectué de l'amont vers l'aval, tandis que les deux autres ont été réalisés perpendiculairement au premier.

### 3.3. Manteau neigeux

Quatre profils stratigraphiques dans le manteau neigeux ont été réalisés en février 2012 afin de valider la possibilité d'une circulation d'air au travers du manteau



neigeux au plus fort de l'hiver. Chacun des deux talus, en bas et en haut du versant, ont fait l'objet de deux profils. La dimension des profils varie entre un et deux mètres de large, et ce, jusqu'au contact avec le sol. En plus d'être photographiés en détail, les profils ont fait l'objet des mesures suivantes : i) épaisseur et résistance au cisaillement et à la compression des différentes couches de neige; ii) caractérisation des cristaux de neige pour chaque couche (taille et formes des cristaux); et iii) température et densité (seulement dans le talus du haut). L'épaisseur du couvert de neige a été mesurée à l'aide d'un ruban à mesurer. La résistance a été évaluée par la difficulté à y insérer des objets de différentes dimensions (poing, doigts ou crayon). La taille et la forme des cristaux ont été déterminées à l'aide d'une loupe par comparaison à un indicateur d'une dimension connue. La température de la neige a été mesurée à l'aide d'un thermocouple relié à un lecteur *Barnant*. Le fil du thermocouple a été inséré à une profondeur de 5 cm à l'intérieur de la neige et ce, à chaque 5 cm sur toute la longueur du profil. Les différents types de neige ont été notés et leur épaisseur mesurée en apposant le ruban à mesurer perpendiculairement au profil stratigraphique (figure 3.2). La densité de la neige a été calculée grâce à l'extraction d'échantillons avec un cylindre dont le volume était connu (figure 3.3). Le cylindre a été enfoncé délicatement à l'intérieur de chacune des couches. Ensuite, le couteau a été enfoncé verticalement jusqu'à l'atteinte de la profondeur où se situait le cylindre servant à « fermer » le devant de celui-ci pour maintenir intact l'échantillon de neige à l'intérieur du cylindre. Ces échantillons ont été par la suite mis dans un sac hermétique et rapportés au laboratoire où, une fois fondu, le volume d'eau équivalent a été mesuré.



Figure 3.2 Photo de gauche : caractérisation du manteau neigeux. Photo de droite : caractérisation des cristaux de neige. Février 2012.



Figure 3.3 Cylindre utilisé pour l'évaluation de la densité du manteau neigeux, février 2012.

De plus, un patron d'épaisseur de neige a été mesuré le long de trois transects de 20 m sur le talus en bas de versant. Pour mesurer l'épaisseur du manteau neigeux, une sonde à neige a été insérée jusqu'au contact avec le substrat. La lecture de l'épaisseur a été effectuée à même la sonde qui était graduée. Pour chaque point de mesure, la moyenne de trois essais a été retenue. La position GPS des extrémités de chaque transect a été enregistrée.

### 3.4. Cartographie des températures de surface

#### 3.4.1. Images thermiques infrarouges

La méthode de télédétection à l'aide d'imagerie thermique infrarouge a pour objectif de définir rapidement et à distance les secteurs où l'on peut retrouver potentiellement des zones de ventilation à la surface du talus. L'imagerie thermique infrarouge permet donc de déterminer la répartition spatiale des secteurs avec un important contraste de température. La caméra thermique utilisée a une caméra optique intégrée permettant la prise d'image mixte. L'image de la caméra thermique est directement convertie en température (°C) selon la chaleur émise par un corps dans l'infrarouge. La température mesurée va dépendre essentiellement de l'émissivité du corps présent dans l'image ainsi que de la température de l'air ambiante. À noter que l'imagerie thermique permet de caractériser seulement la température de surface, et non la température de surface du sol. En présence d'un manteau neigeux continu par exemple, cette méthode ne permet pas de détecter les différences de température du sol sous le couvert de neige.

#### 3.4.2. Mesures de la température du sol

Des capteurs de températures ont été installés à la surface du sol aux endroits ciblés dans un premier temps lors du repérage des points d'entrées et de sorties d'air. Ces

capteurs ont été utilisés afin de mesurer l'évolution de l'échange d'air entre le sol et l'atmosphère. Les données sont enregistrées à une haute fréquence (toutes les heures), ce qui fournit des données de façon pratiquement continues pour une période donnée. Cependant, cette méthode ne fournit pas une résolution spatiale très grande, puisque les points de mesures sont ponctuels le long du talus et le nombre de capteurs installés sur le terrain est limité.

Différents types de capteurs peuvent être utilisés pour obtenir l'enregistrement en continu de la température à la surface du sol (Delaloye *et al.*, 2007; Morard, 2011). Nous avons opté pour les capteurs de type I-Button, dû à leur faible coût et à leur fiabilité. Plusieurs de ces capteurs ont été installés à différents secteurs le long du versant du mont Hog's back, soit dans le haut et le bas de talus d'éboulis, afin de mettre en évidence les anomalies thermiques reliées au système de ventilation. Le traitement des données a été réalisé à l'aide du logiciel 1-WIRE fourni par l'entreprise Maxim et du logiciel Excel.

Afin de bien localiser les capteurs, un ruban orange a été laissé près de chaque endroit et plusieurs photos des emplacements ont été réalisées. Les capteurs ont aussi tous été intégrés à un piquet de bois peinturé afin de bien les retrouver et pour ne pas les égarer dans talus (figure 3.4). Les I-Buttons ont tous été fixés à un trou préalablement perforé à la base des piquets, ce qui a permis de les enfoncer plus profondément dans le sol (entre 10 et 30 cm).





Figure 3.4 Piquet utilisé pour l'installation des I-Buttons (flèche noire) sur le site d'étude.

Les I-Buttons utilisés sont d'un modèle *DS1922L-F5 Thermochron*. Les capteurs de ce modèle peuvent mesurer des températures variant entre  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  et  $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$  avec une précision de  $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  entre  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  et  $+65\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Le modèle 8 bit peut enregistrer jusqu'à 8192 données selon un pas de temps de 1 seconde à 273 heures. La programmation du capteur et la lecture des données se fait à l'aide du logiciel 1-WIRE.

Dans le but de pouvoir analyser les températures du sol, vingt capteurs de température de type I-Button ont été mis en place dans le talus d'éboulis du mont Hog's Back. Trois I-Button ont été placés à la base du talus au droit de sorties d'air frais (secteur 1), sept en haut du talus dans des zones apparentes de fonte (secteurs 2,

3 et 4), et finalement, trois ont été installés afin d'enregistrer la température de l'air aux secteurs 1 à 3. À noter que sept capteurs supplémentaires avaient initialement été placés, mais ceux-ci ont pour la plupart mal fonctionné et certains n'ont pas été retrouvés.



## CHAPITRE IV

### RÉSULTATS

Ce chapitre a pour objectif de présenter les principaux résultats obtenus lors des sorties sur le terrain. Dans un premier temps, les indices thermiques du talus d'éboulis seront présentés. Ensuite, les divers indices visuels observés seront synthétisés. Pour conclure, les résultats de la méthode géoélectrique utilisée seront présentés.

#### 4.1. Indices thermiques

Les indices thermiques ont été obtenus grâce à l'imagerie thermique et à l'enregistrement en continu de la température du sol.

##### 4.1.1. Images thermiques

L'imagerie thermique infrarouge nous a permis d'identifier les secteurs à fort contraste local de température, ce qui a permis de localiser les zones préférentielles où installer les capteurs de température. Cette technique, bien qu'elle ne fournisse que des données ponctuelles dans le temps, nous permet aussi de mesurer l'ampleur du phénomène de ventilation à la surface du talus (figure 4.1). Des contrastes thermiques allant jusqu'à 18 °C ont été mesurés entre les sorties d'air et l'environnement ambiant (figure 4.2).

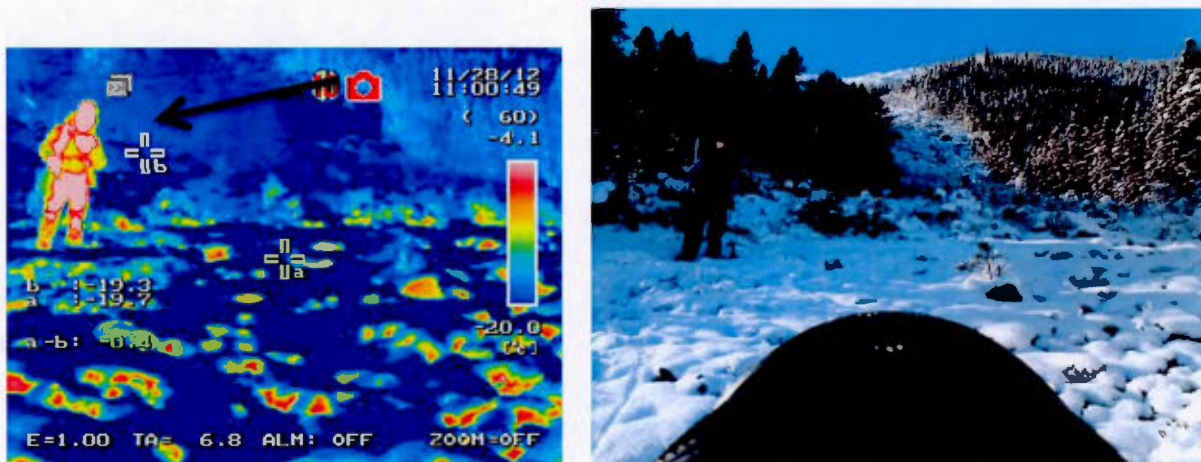


Figure 4.1

Photographie thermique infrarouge. Gauche : secteur 2. Sur la photographie thermique, on peut voir les trappes d'air chaud (rouge) qui percent le sol couvert d'une mince couche de neige (bleu). On voit une personne comme référence dans l'image (flèche noire). Droite : image réelle.

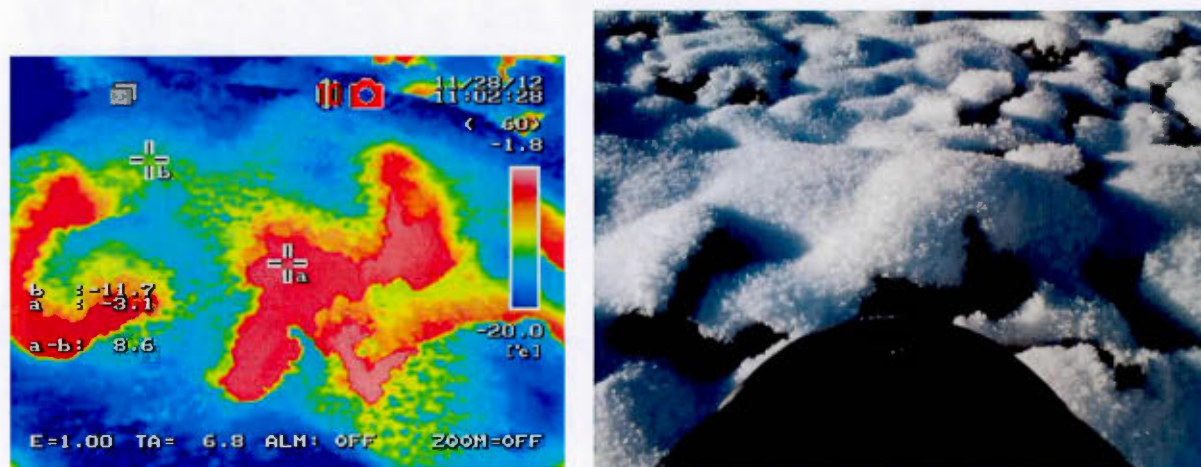


Figure 4.2

Photographie thermique infrarouge. Gauche : sortie d'air chaud dans le secteur 2. On note une différence de 18,2 °C entre la sortie d'air chaud (rouge) et la neige autour (bleu). Droite : image réelle.

#### 4.1.2. Indices thermiques en continu

Les courbes de température issues des données en provenance des I-Button sont généralement homogènes par rapport aux autres capteurs du même secteur (figure 4.3), ce qui démontre une certaine fiabilité par rapport à chacun des emplacements et aux données obtenues. Ces courbes de la température du sol ont permis de mettre en évidence certaines caractéristiques d'un système de circulation d'air dans un milieu poreux.



Figure 4.3 Localisation des secteurs investigués avec des capteurs thermiques.

#### 4.1.3. Température du sol dans la partie basse des talus d'éboulis (Secteur 1)

Durant la saison d'été (avril à octobre), la température du sol ne dépasse que rarement la barre des 7 °C, alors que la température de l'air se maintient autour de 15 °C, ce qui concorde avec l'effet d'une sortie d'air froid dans la partie basse du talus (figure 4.4). Vers la fin de l'été (septembre), le sol se refroidit suivant la température de l'air,

mais ce dernier ne se réchauffe pas autant que l'air ambiant lors des pics de grande chaleur. En octobre, la température du sol suit de plus en plus celle de la température de l'air et ce, jusqu'à la fin janvier (2012) ou février (2013), où l'on commence à observer un décalage entre les deux courbes. Cette tendance va se maintenir jusqu'à la période de fonte en avril, où la température du sol stagne à 0 °C (zéro curtain) jusqu'à la fonte complète de la neige vers la mi-juin.

Le régime thermique de ces capteurs correspond au comportement de type IV décrit par Delaloye (2004), qui se traduit par des températures « normales » en hiver et froides en été, ce qui est le comportement typique de la partie basse d'un éboulis ventilé, mais sans l'aspiration d'air en hiver.



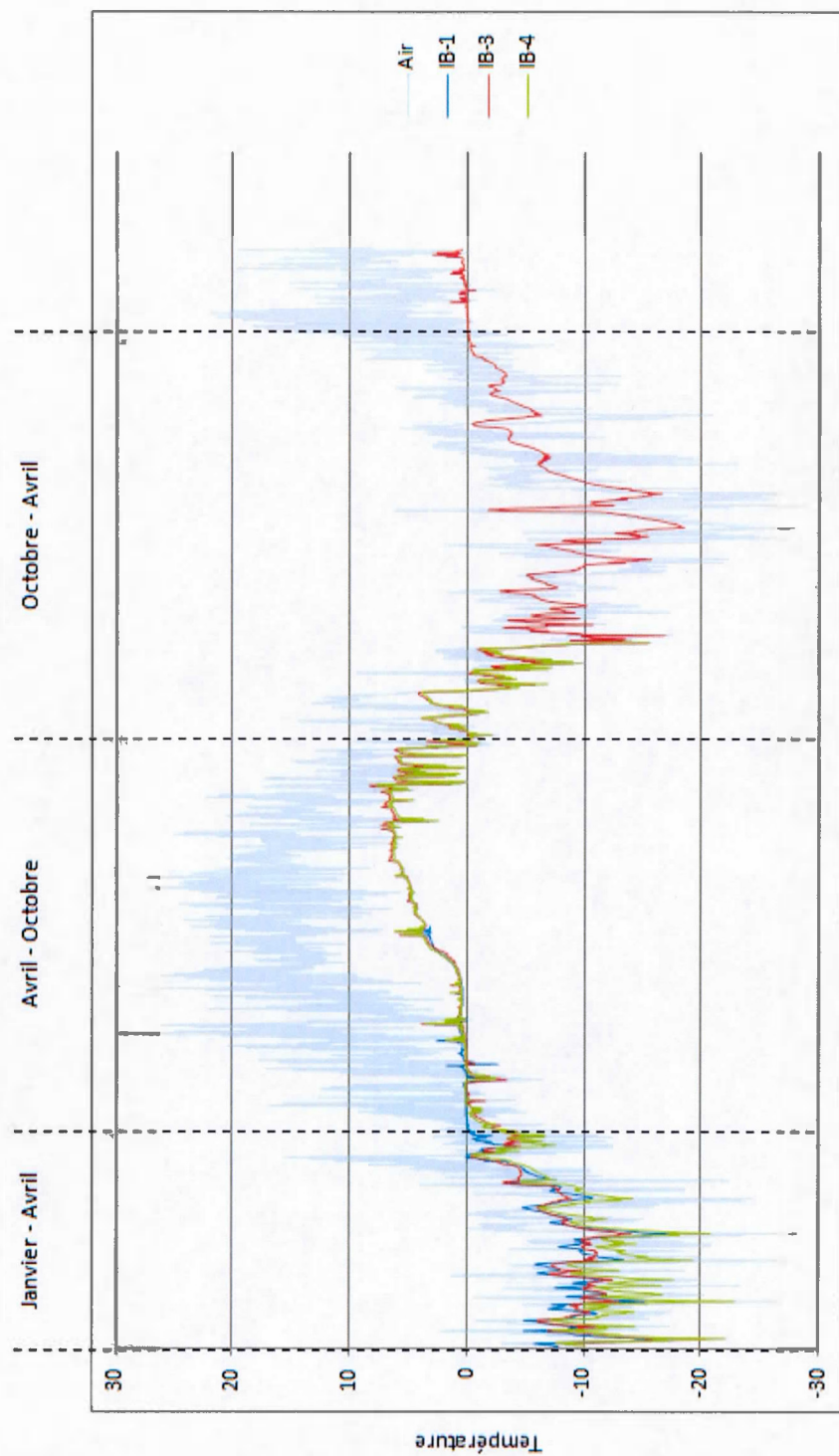


Figure 4.4 Température du sol dans la partie basse d'un des talus d'éboulis et température de l'air ambiant (secteur 1), de janvier 2012 à avril 2013.

#### 4.1.4. Température du sol dans la partie haute des talus d'éboulis (Secteurs 2, 3, 4)

L'évolution thermique du sol enregistrée par les capteurs dans le secteur 2 (figure 4.5) suit celle de la température de l'air en été (à partir du mois de mai). En début de régime hivernal, la température oscille légèrement au-dessus de 0 °C jusqu'en janvier, puis stagne à 0 °C, ce qui laisse croire à un enneigement rapide qui empêche tout échange thermique entre le sol et l'air ambiant.

Bien qu'installé dans des zones de trappes d'air chaud, les températures enregistrées par les capteurs ne semblent correspondre qu'en partie à un régime de haut de talus, lequel devrait s'apparenter au type I de Delaloye (2004), soit chaud en hiver et « normal » en été.

Les caractéristiques du secteur 3 ressemblent au secteur précédant, hormis qu'il se situe sur une portion de talus légèrement plus en amont sur le flanc de la montagne. Aucun indice visuel et probant n'a cependant été repéré indiquant la présence d'un système de ventilation, les capteurs ont été installés pour validation.

En observant la température du sol (figure 4.6), on remarque encore une fois une stagnation de la température autour de 0 °C durant la saison hivernale, soit à partir du mois de janvier, pour ensuite noter de nouveau une concordance entre la température du sol et de l'air autour du mois de mai. Cependant, on observe quelques anomalies dans le régime thermique du sol en hiver correspondant aux fortes variations de la température extérieure, alors que la température du sol diminue jusqu'à -4 °C, notamment durant tout le mois de mars. Comme le secteur 2, les températures enregistrées par ces capteurs ne semblent pas correspondre à un régime de haut de talus (type I; Delaloye, 2004).



Placé en bordure de la route 299 dans ce qui semble être une trappe d'air chaud, la température enregistrée par le capteur du secteur 4 confirme l'apport d'air chaud tout au long de l'hiver (figure 4.7), maintenant ainsi une température supérieure à 0 °C. La température du sol semble suivre celle de l'air à partir du mois d'avril. Le comportement thermique dans ce secteur se rapproche grandement du régime de type I de Delaloye (2004), soit chaud en hiver et « normal » en été.

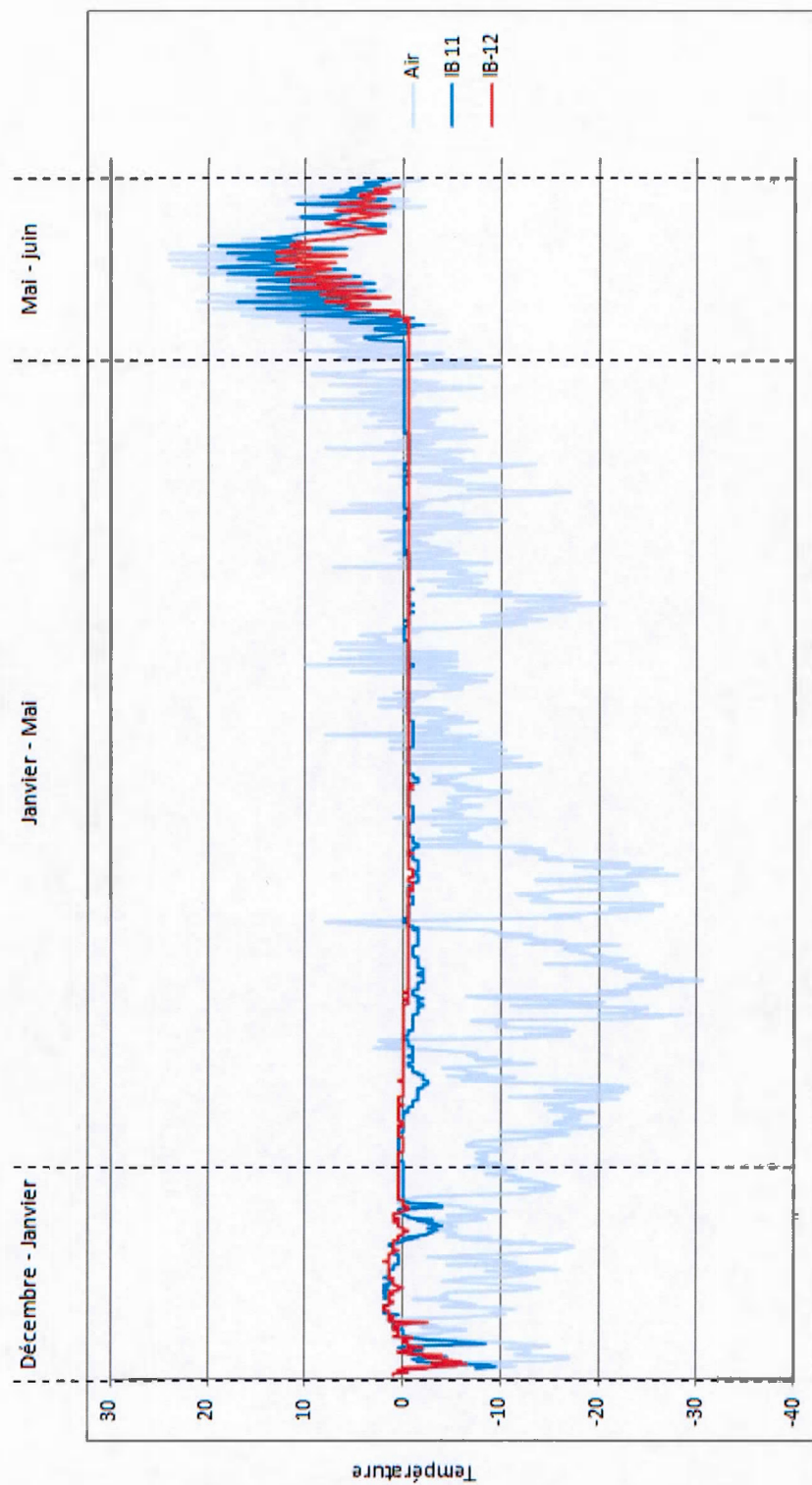


Figure 4.5 Température du sol dans la partie haute d'un des talus d'éboulis et température de l'air ambiant (secteur 2), de décembre 2012 à juin 2013.

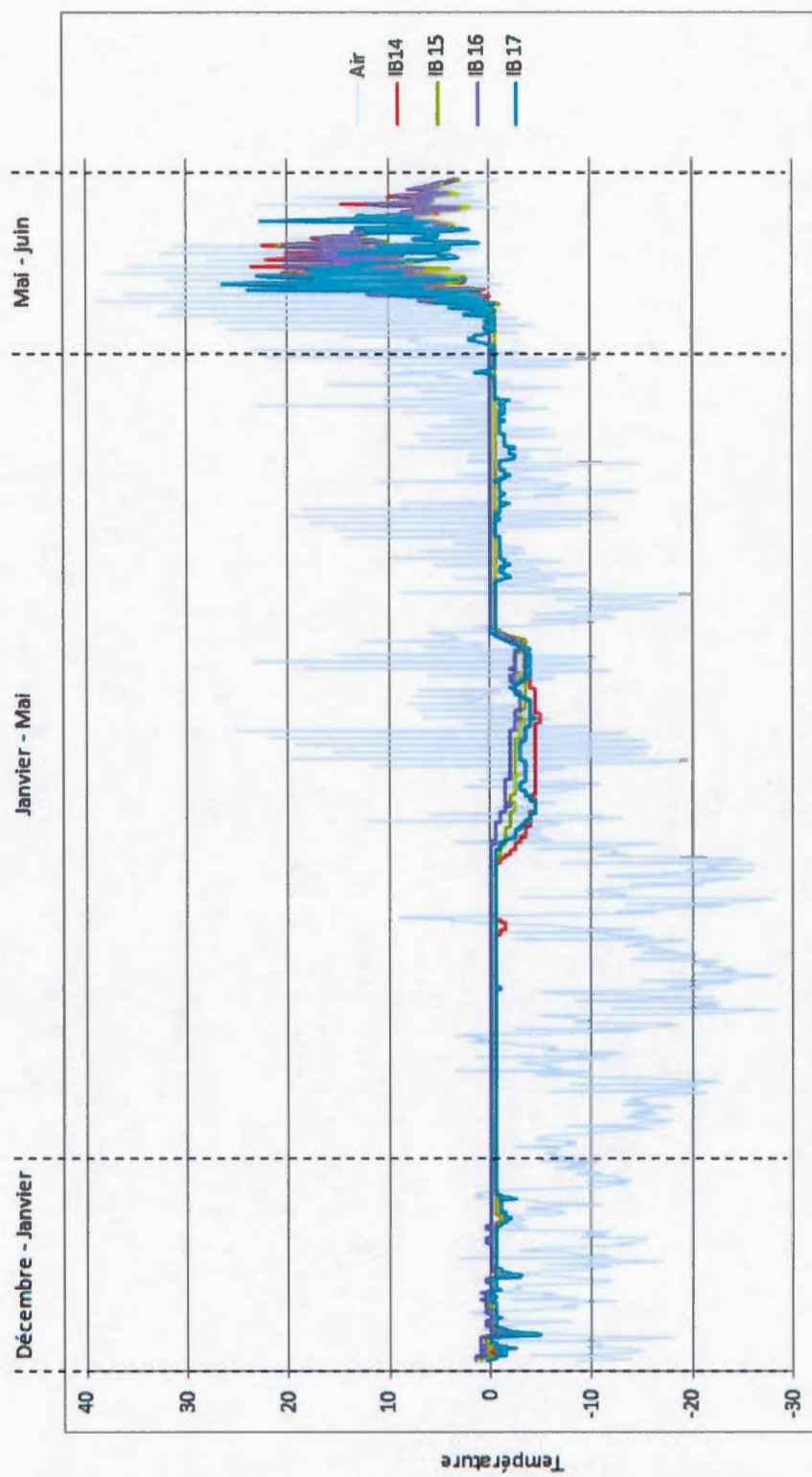


Figure 4.6

Température du sol dans la partie haute d'un des talus d'éboulis et température de l'air ambiant (secteur 3), de décembre 2012 à juin 2013.

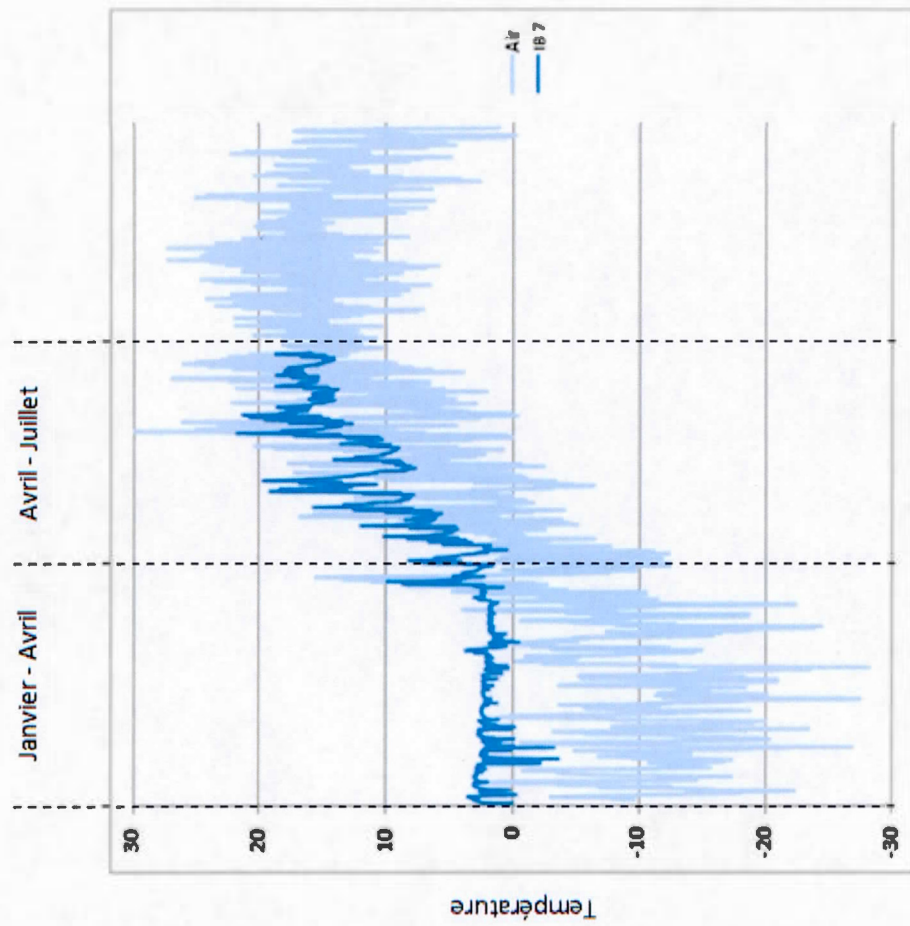


Figure 4.7

Température du sol dans la partie haute d'un des talus d'éboulis et température de l'air ambiant (secteur 4), de février 2012 à juillet 2012.



#### 4.2. Indices visuels

Lors du choix initial des secteurs d'étude, une attention particulière a été portée à l'observation de zones de fonte (dans le haut du talus) et aux zones plus fraîches (dans le bas du talus) afin de cibler les secteurs les plus actifs. Les zones de fontes reliées à un système de ventilation sont habituellement accompagnées de cristaux de givre provenant de l'humidité de l'air soufflé depuis l'intérieur du talus (figure 4.8).



Figure 4.8 Photo de gauche : cristaux de givre directement à la sortie d'une trappe d'air chaud. Photo de droite : cristaux de givre recouvrant un arbuste près d'une trappe d'air chaud.

Quant aux zones de sortie d'air froid, elles sont plutôt caractérisées par la présence abondante de mousse au sol, type de végétation azonale dans un milieu granulaire poreux (figure 4.9).





Figure 4.9                      Mousses et lichens retrouvés dans le bas d'un des talus d'éboulis près des sorties d'air froid.

De nombreux auteurs mentionnent une présence très diversifiée et azonale de la végétation dans le bas de talus ventilés (Bertinelli *et al.*, 1993; Delaloye *et al.*, 2007; Morard, 2011). Cependant, une telle diversité n'a pas été observée au mont Hog's Back (hormis la mousse).

Le manteau neigeux à la surface du talus d'éboulis a fait l'objet d'une attention particulière à différents stades de l'hiver. Lors d'un relevé de terrain au début d'hiver 2012 (novembre), des trous d'aspiration à travers le manteau neigeux ont été remarqués à la base du talus d'éboulis (figure 4.10). La formation de ces trous d'aspiration est possible seulement lorsqu'une mince couche de neige recouvre le talus (Delaloye *et al.*, 2007). Ces trous sont aussi caractérisés par l'absence de cristaux de givre et un sol sec, contrairement aux trappes avec expulsion d'air chaud.



Figure 4.10 Trous d'aspiration à travers le manteau neigeux, novembre 2012.

Plus tard en hiver (février 2012), des profils stratigraphiques du manteau neigeux ont été réalisés sur les talus d'éboulis du mont Hog's Back afin de valider la possibilité d'échange d'air entre l'intérieur et l'extérieur du talus (tableau 4.1). Les deux premiers profils, HG1 et HG2 (figure 4.12), ont été réalisés sur le talus en bas de pente près des trous d'air chaud du secteur 2. La surface du sol au droit de HG1 était recouverte de cailloux d'une dimension approximative de 15 cm tandis qu'au droit de HG2 le sol était couvert de conifères bas (krumholz). Une couche de glace recouvrait la végétation présente sous le manteau neigeux à HG2. Dans les deux coupes, une couche de glace de 0,5 cm d'épaisseur a été localisée sous la couverture de neige fraîche, et ce, à une profondeur moyenne de 25 cm. Sous la première couche de glace, un dépôt de neige monocristalline reposait sur une seconde couche de glace de 0,5 cm d'épaisseur pour HG2 et 1,0 cm pour HG1 à 55 cm de profondeur. Sous-jacente à la

deuxième couche de glace, un dépôt de neige polycristalline a été observé jusqu'au fond des coupes entre 90 cm et 70 cm au droit de HG1 et HG2 (figure 4.11).



Figure 4.11 Photo de gauche : Coupe HG1 sur cailloux. Photo de droite : Coupe HG2 sur krumholtz. Février 2012.

Deux autres profils du manteau neigeux, soit HG3 et HG4 (figure 4.13) ont été effectués sur le talus d'éboulis en haut de pente près du secteur 3. Au droit de HG3, de la neige fraîche constituait les 30 premiers centimètres de la coupe. Le reste de la stratigraphie, de 112 cm au total, était composée de neige dont les grains étaient arrondis. Elle était sèche sur les 80 premiers centimètres, puis devenait humide jusqu'au fond par la suite. Deux couches de glace d'une épaisseur de 1,0 cm chacune divisaient le manteau neigeux; la première à 30 cm et la seconde à 80 cm de profondeur. Concernant le gradient de température à l'intérieur du manteau neigeux, il était négatif ( $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) sur les 10 premiers centimètres. Plus en profondeur, le gradient

de température s'élevait de 0,6 °C/10 cm. Le transfert thermique par conduction dans le manteau neigeux, exprimé en watt par mètre-kelvin, a été calculé selon l'équation  $Q = k \, dt/dz$ , où  $k$  représente la conductivité thermique et  $dt/dz$  le gradient thermique. Un gradient thermique de 0,6 °C/10 cm, une densité de 0,05 g/cm<sup>3</sup>, 0,16 g/cm<sup>3</sup>, 0,25 g/cm<sup>3</sup>, une épaisseur de neige de 34,5 cm, 49,0 cm et 29,5 cm, des conductivités thermiques de 0,03, 0,09 et 0,20 W/mK ont été calculées pour les trois couches de neige au sein du manteau neigeux, de la surface vers la base respectivement.

Au droit de la coupe HG4, la neige fraîche de surface constituait les 50 premiers centimètres, le reste du manteau neigeux était caractérisé comme de la vieille neige. Deux couches de glace de 1,0 cm d'épaisseur divisaient le manteau neigeux, la première à 50 cm et la seconde à 66 cm de profondeur. Sous la deuxième croute de glace, plusieurs lentilles de glace discontinues ont été observées, mais non mesurées. De la surface vers le bas, le gradient de thermique était de 0,25 °C/10 cm. Avec un gradient thermique de 0,25 °C/10 cm, une densité de 0,19 g/cm<sup>3</sup>, 0,1 g/cm<sup>3</sup>, 0,23 g/cm<sup>3</sup>, une épaisseur de neige de 50, 14 et 99 cm, des conductivités thermiques de 0,12, 0,10 et 0,17 W/mk ont été calculés dans les trois couches de neige au sein du manteau neigeux, depuis la surface vers la base. L'ensemble des résultats est présenté à la figure 4.13. Trois transects ont également été effectués entre HG1 et HG2 pour déterminer l'épaisseur du couvert nival, laquelle variait entre 71 cm et 146 cm (Tableau 4.2)



Tableau 4.1 Profil de neige au mont Hog's Back, 2012.

<b>Coupe HG1</b>			
Couche	Épaisseur (cm)	Type de neige	Pénétrabilité
A	22	Neige fraîche	poing
B	2	Neige croûtée	crayon
C	0,5	Glace	
D	30	Neige croûtée, monocristaux fins	
E	1	Glace continue	
F	35	Neige polycristalline	
G	5	Petits gobelets mal définis	

<b>Coupe HG2</b>			
Couche	Épaisseur (cm)	Type de neige	Pénétrabilité
A	30	Neige fraîche	poing
B	0,5	Croûte de glace	crayon
C	24,5	Neige monocristalline	
D	0,5	Glace	
E	14,5	Neige polycristalline	
F	50	Glace colonnaire (coulée le long de l'arbre)	

<b>Coupe HG3</b>			<b>Densité</b>			<b>Pénétrabilité</b>
Couche	Épaisseur (cm)	Type de neige	Vol	masse d'eau	Mass. Vol g/cm <sup>3</sup>	
A	34,5	Neige fraîche, particules reconnaissables	240,33	12,5	0,05	Poing fermé
B	1	Croûte de glace				
C	49	neige sèche, grains ronds	240,33	37,5	0,16	4 doigts
D	1	Croûte de glace				
E	29,5	neige mouillée, grains ronds	240,33	60	0,25	4 doigts



Tableau 4.1 (suite)

Profil de neige au mont Hog's Back, 2012.

<b>Coupe HG4</b>			<b>Densité</b>			<b>Pénétrabilité</b>
<b>Couche</b>	<b>Épaisseur (cm)</b>	<b>Type de neige</b>	<b>Vol</b>	<b>masse d'eau</b>	<b>Mass. Vol g/cm<sup>3</sup></b>	
A	50	Neige fraîche, particules reconnaissables	240,33	45	0,19	Poing fermé
B	1	Croûte de glace				
C	14	Neige	240,3324	40	0,17	4 doigts
D	1	Croûte de glace				
E	99	Neige sèche contenant beaucoup de lentilles de glace	240,3324	55	0,23	4 doigts

Tableau 4.2

Couvert nival observé le long de trois transects, 2012.

<b>Transect A</b>		<b>Transect B</b>		<b>Transect C</b>	
<b>Référence</b>	<b>Épaisseur de neige (cm)</b>	<b>Référence</b>	<b>Épaisseur de neige (cm)</b>	<b>Référence</b>	<b>Épaisseur de neige (cm)</b>
A0	101	B1	80,5	C1	71,5
A1	112	B2	80	C2	78,5
A2	95	B3	85	C3	75
A3	115	B4	105	C4	92
A4	105	B5	95	C5	87
A5	108	B6	75	C6	97
A6	115	B7	102		
A7	116	B8	97		
A8	140				
A9	146				

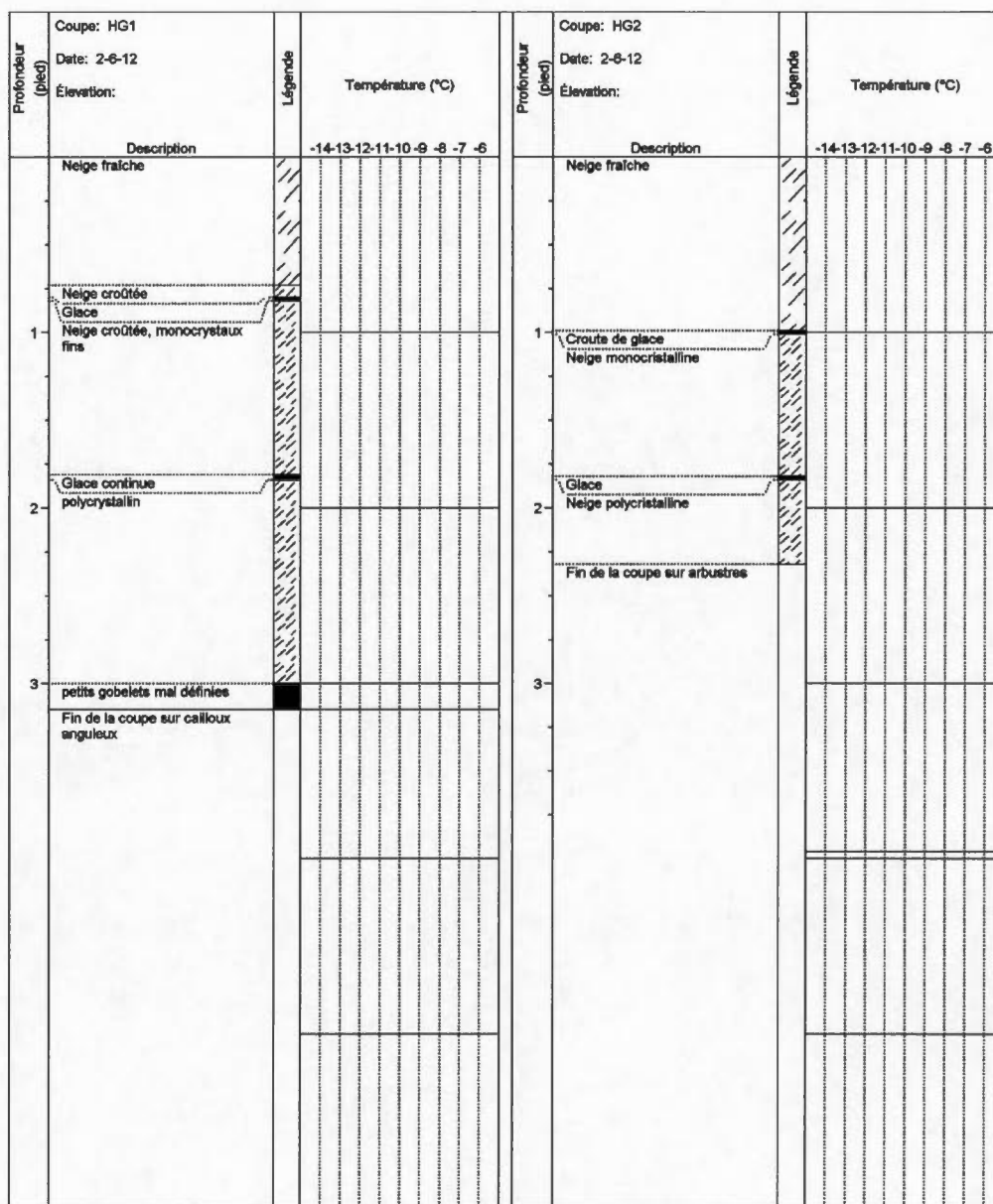


Figure 4.12

Profils du manteau neigeux HG1 et HG2.

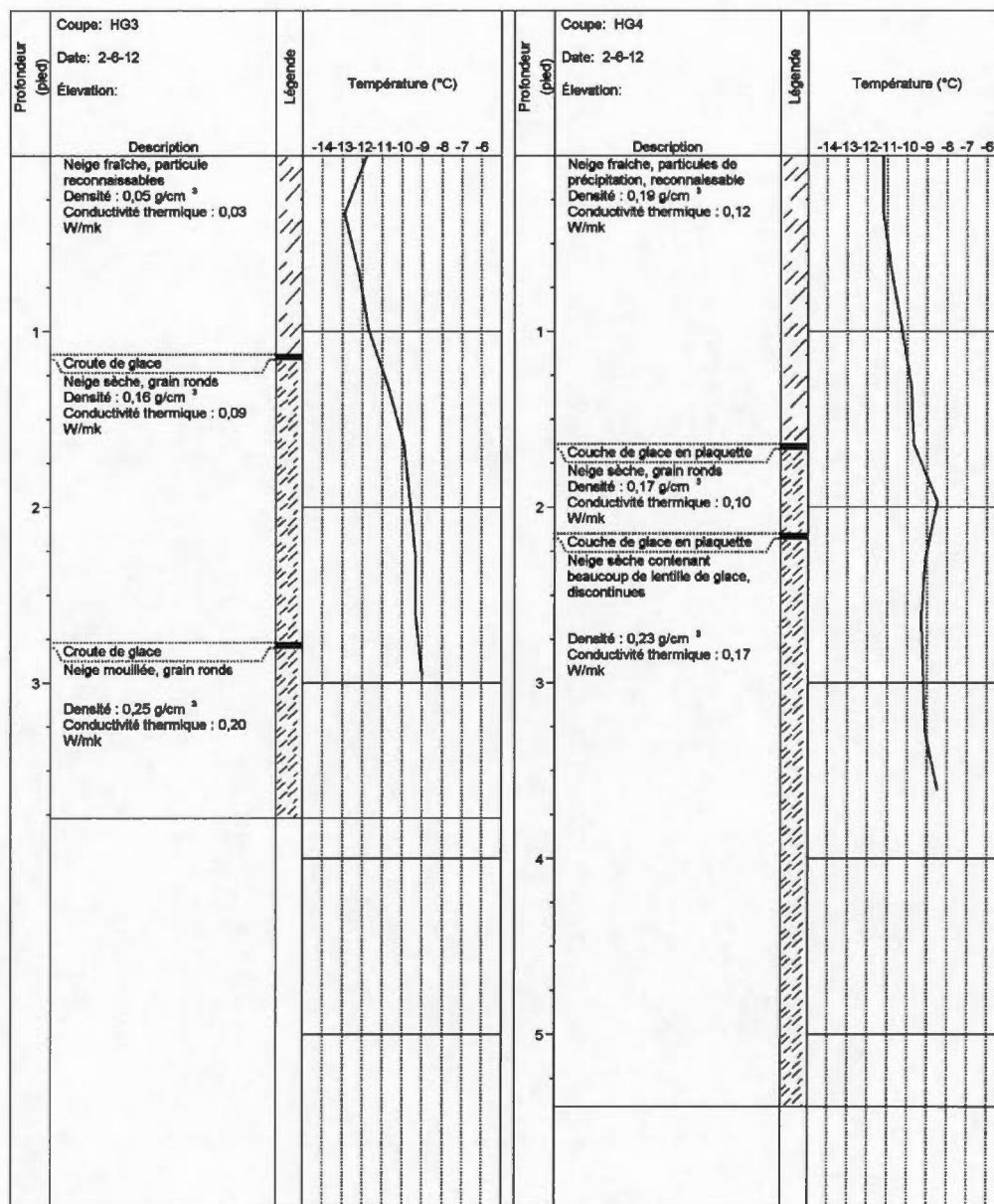


Figure 4.13

Profils du manteau neigeux HG3 et HG4.

#### 4.2.1. Temps de résidence de l'air dans l'éboulis

Deux fumigènes nautiques ont été injectés dans l'entrée d'air à la base du talus d'éboulis en décembre 2012 afin de calculer le temps de résidence de l'air dans le talus et déterminer ainsi l'efficacité du système de ventilation (figure 4.14). Cependant, après 45 minutes d'attente, aucun signe de la résurgence de la fumée n'a été noté à la surface du talus. Contraint par un manque de temps (et le début de la noirceur), nous n'avons pas été en mesure de tirer de conclusions probantes suite à cette expérience. Nous avons tout de même constaté que le temps de résidence d'une particule d'air dans ce talus d'éboulis n'est pas «très court» comme l'a supposé Morard (2011) dans les Alpes suisses.



Figure 4.14                      Enfumage d'un trou d'aspiration à l'aide de fumigènes nautiques. Décembre 2012.

### 4.3. Indices géophysiques

Trois profils longitudinaux réalisés à l'aide d'un GPR ont permis d'évaluer l'ampleur des dépôts et la profondeur de l'interface entre le dépôt poreux du talus d'éboulis et le dépôt sous-jacent et la roche en place, le cas échéant. Les deux premiers profils ont été réalisés de manière perpendiculaire à la pente du talus (LINE-01 et LINE-02) et un dernier depuis l'amont vers l'aval (LINE-03) (figure 4.15). Les résultats des deux premiers profils (figures 4.16 et 4.17) obtenus sous forme de graphique, révèlent un premier contact avec le dépôt granulaire et un dépôt sous-jacent entre 3,5 m et 4,5 m de profondeur. Sur les graphiques, on note que le dépôt poreux semble plus épais dans sa portion nord (dans la portion droite du graphique), du même côté où les trappes d'air chaud ont été observées (secteur 2). Sous ce premier contact, un autre dépôt semble se dessiner sur une épaisseur variant de 2,0 m à 3,0 m. En recoupant ces données avec la coupe stratigraphique réalisée en aval du talus et des profils géoélectrique, ce dépôt pourrait s'apparenter à un till glaciaire. À cette profondeur, bien que le signal devienne plutôt diffus, on distingue une nouvelle couche autour de 7,0 m à 8,0 m, vraisemblablement associée à la roche en place.

Le dernier profil effectué depuis l'amont vers l'aval du talus (figure 4.18), montre une géométrie convexe du dépôt granulaire poreux avec, dans sa partie haute, une plus faible profondeur ( $\pm 1,0$  m) par comparaison à la partie basse ( $\pm 6,0$  m). Sous ce dépôt, une nouvelle couche se dessine, sur une épaisseur de 2,0 m à 3,0 m. Plusieurs bandes discontinues et contrastées provenant de la roche en place, sans doute, apparaissent sous les premières couches. Ces bandes pourraient être en lien avec des fractures et des discontinuités dans le roc où l'eau peut circuler et renvoyer un signal fort au récepteur du GPR.



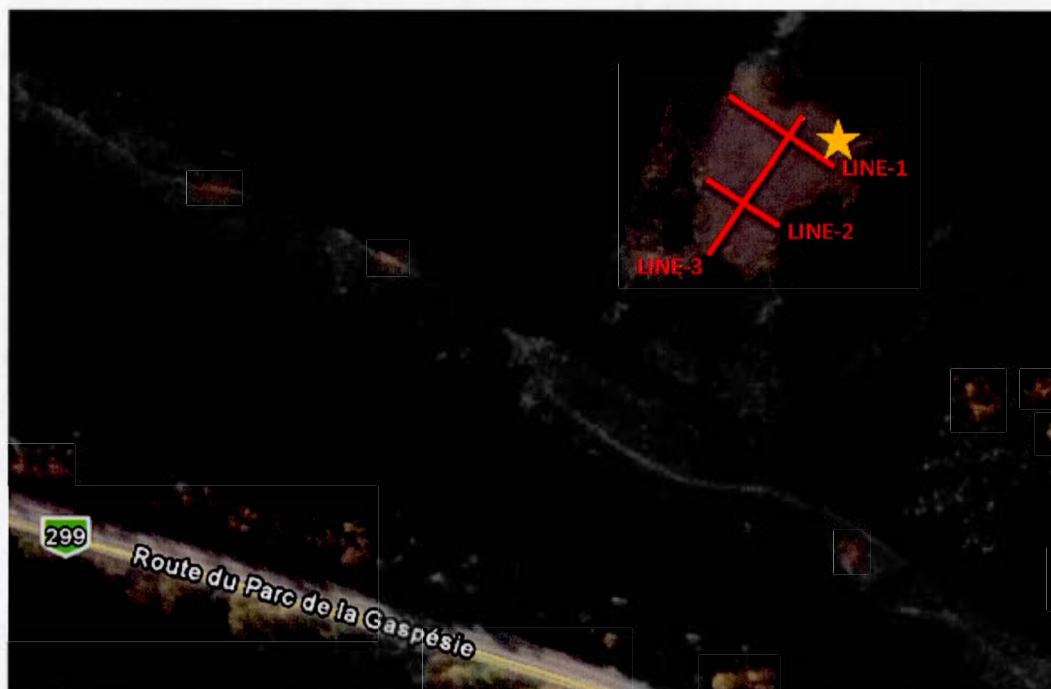


Figure 4.15 Localisation des profils géoélectriques (lignes rouges) et localisation du secteur 2 investigué avec des capteurs thermiques (étoile orange).

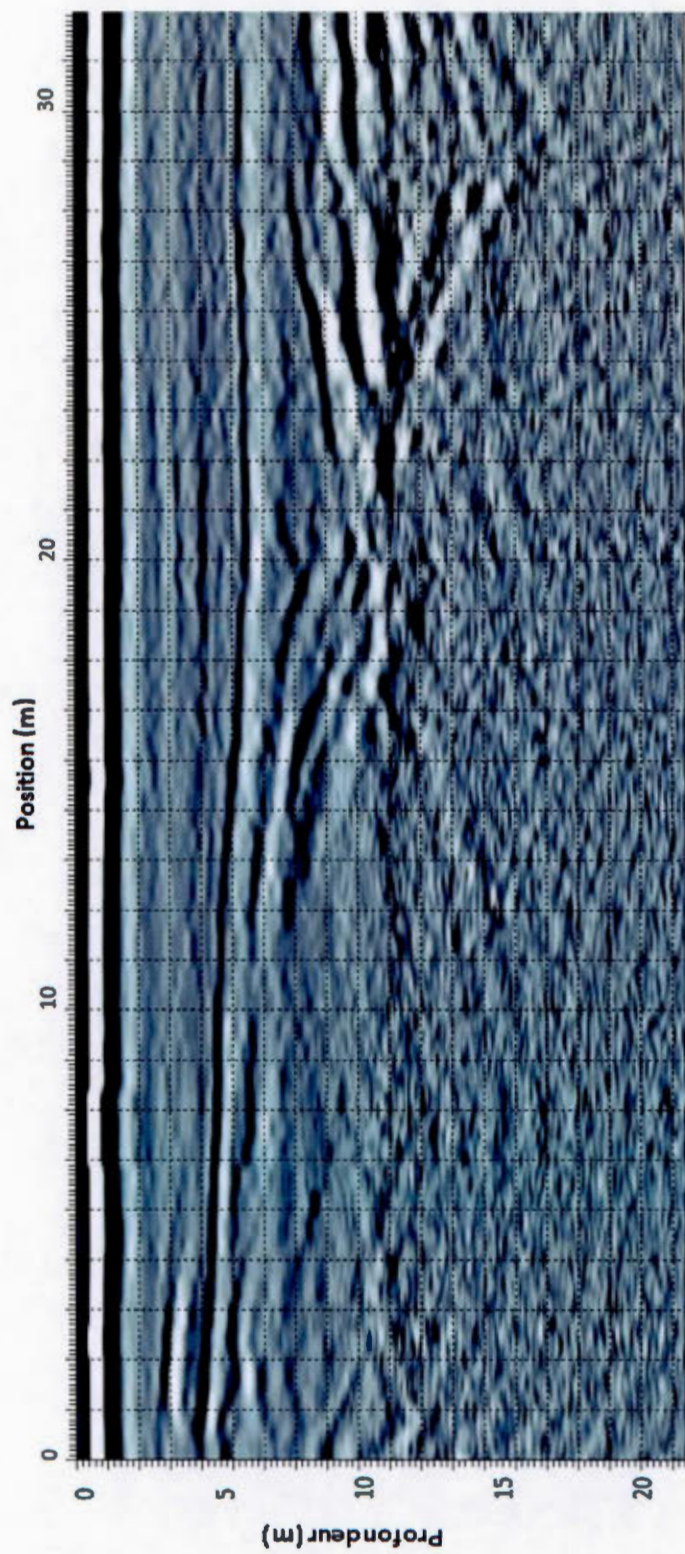


Figure 4.16 Profil géoélectrique LINE-1 effectué perpendiculairement à la pente du sud au nord, et en amont du talus d'éboulis en bas de versant.



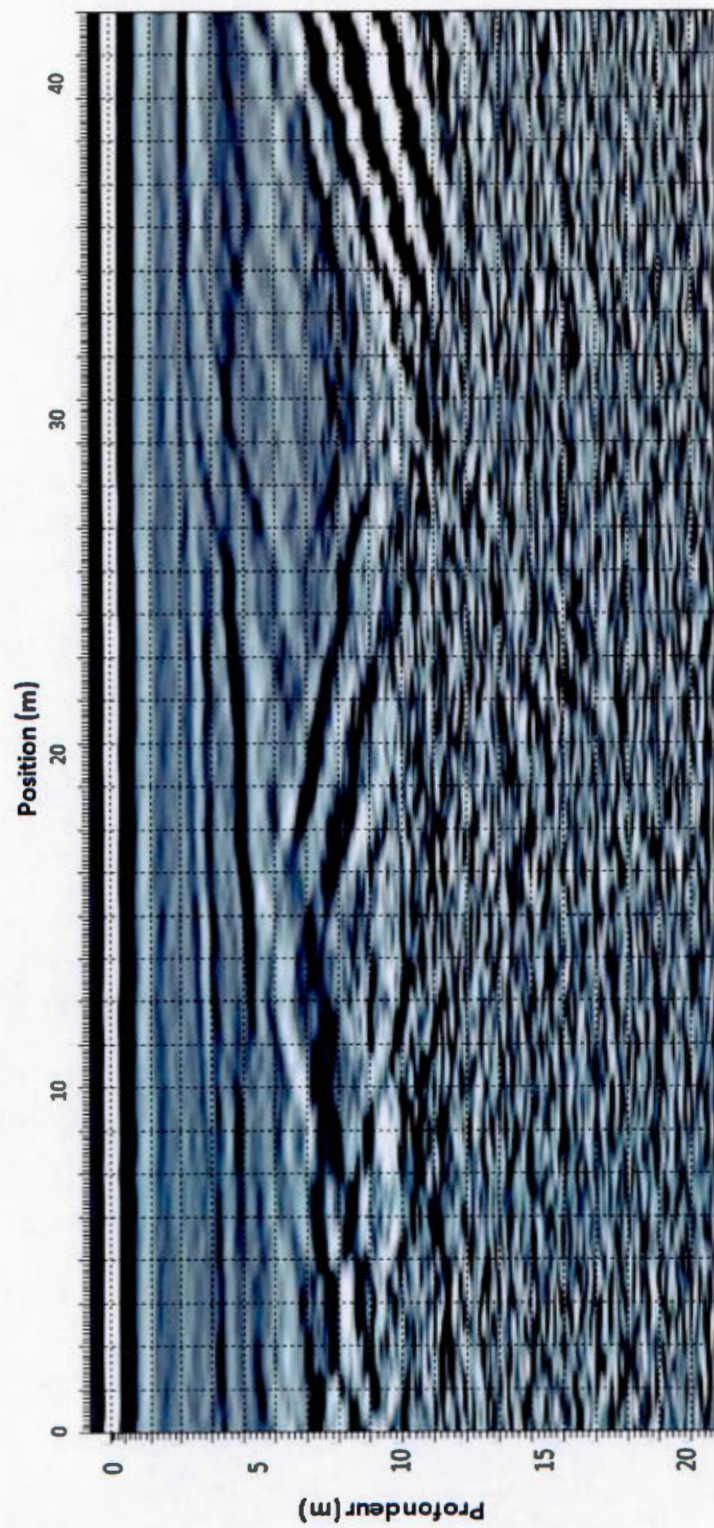


Figure 4.17 Profil géoélectrique LINE-2 effectué perpendiculairement à la pente, du sud au nord, et en aval du talus d'éboulis en bas de versant.

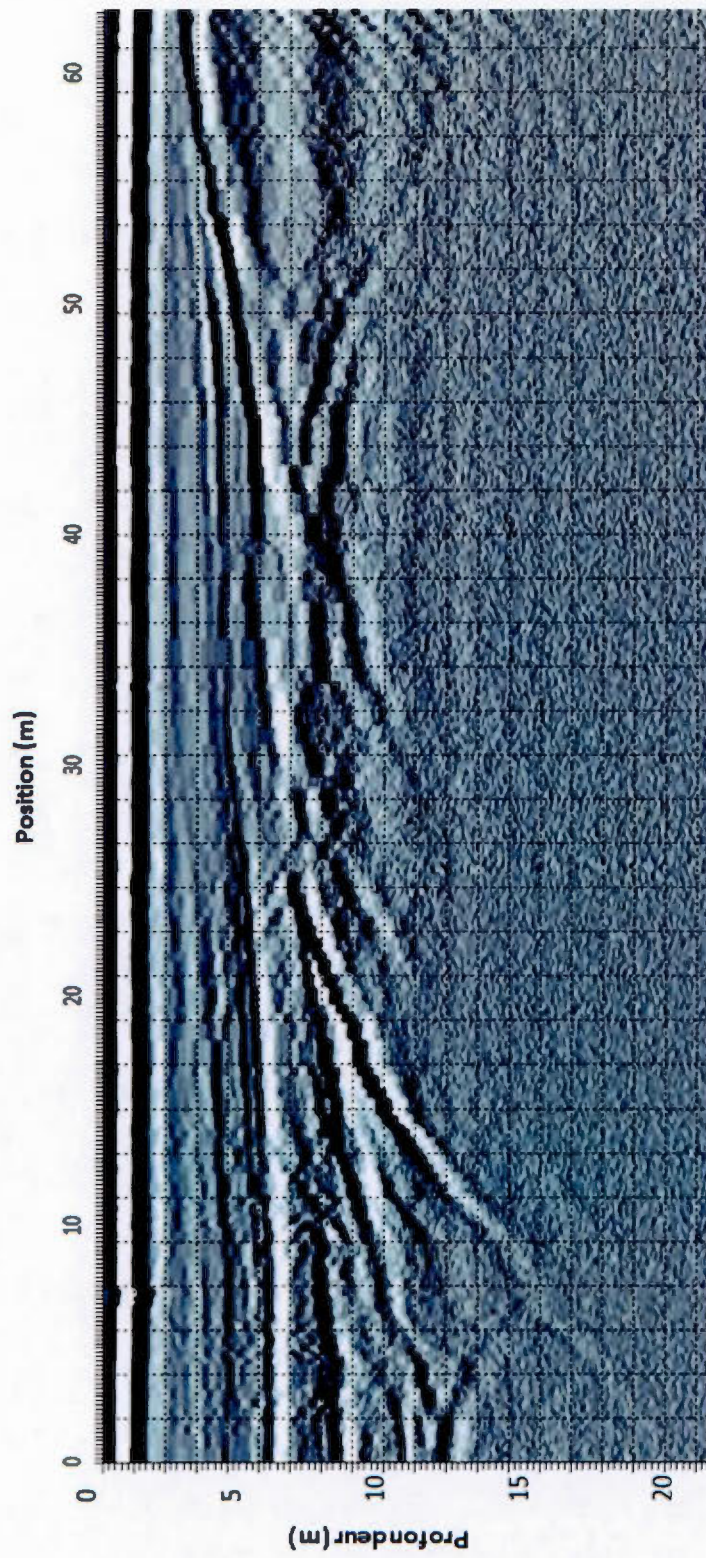


Figure 4.18 Profil géoélectrique LINE-3 effectué au milieu du talus d'éboulis en bas de versant de l'amont vers l'aval.



## CHAPITRE V

### DISCUSSION

Dans ce chapitre, seront abordées les différentes évidences observées sur le talus d'éboulis en lien avec un système de ventilation interne. Les impacts que le processus de ventilation impose à son milieu seront discutés tout comme les limites sur le plan méthodologique. Enfin, certaines interrogations existantes seront soulevées par rapport aux processus de ventilation interne.

#### 5.1. Évidences visuelles de la ventilation hypogée

Dans la partie supérieure d'une formation sédimentaire ventilée, le régime hivernal ascendant est visible à travers plusieurs signes caractéristiques, à savoir : une fonte hâtive et ponctuelle en présence d'un faible couvert de neige, des souffles d'air chaud, des phénomènes de condensation et de formation de givre aux droits des sorties d'air, etc. (Delaloye et Lambiel, 2005; Delaloye *et al.*, 2007; Morard, 2011). Dans la partie basse du talus d'éboulis, des trous d'aspiration peuvent être présents lorsque l'épaisseur de neige est encore faible. Ces trous se distinguent des résurgences (trous souffleurs) d'air chaud par l'absence de givre ainsi qu'un sol plutôt sec et froid. Lors de la saison estivale et du régime descendant, des courants d'air froid, un sol gelé et des plaques de neige résiduelle sont perceptibles. Une végétation azonale, caractérisée par des plantes arctiques-alpines, colonise généralement ces secteurs affectés par la décharge gravitaire d'air froid (Delaloye *et al.*, 2007; Morard, 2011).

Au mont Hog's Back, des anomalies thermiques ont été observées à la surface de certains talus d'éboulis. En effet, l'expulsion d'air chaud chargé d'humidité, la



formation de givre et une fonte précoce du manteau neigeux ont été observées dans le haut du talus en bas de versant et dans le talus en bordure de route au début de la saison hivernale. En période estivale, l'expulsion d'air frais et la présence de mousse à la base du talus ont été notées dans ces mêmes talus. Ces anomalies confirment la présence d'un mécanisme de ventilation au sein du dépôt granulaire grossier qui compose le talus d'éboulis, tel que rapporté à maintes reprises dans les Alpes suisses (Lambiel, 2006; Delaloye *et al.*, 2007; Morard, 2011).

## 5.2. Comportement thermique

On distingue deux régimes principaux de circulation d'air dans un système d'éboulis ventilé : le régime hivernal (ascendant) et le régime estival (descendant). En régime hivernal, on observe une ascension de l'air chaud à l'intérieur du talus, puisque moins dense que l'air extérieur (Luetscher et Jeannin, 2004b; Guodong *et al.*, 2007; Morard, 2011). Bien que des évidences d'un processus de ventilation hypogée aient été observées à divers endroits à la surface des talus d'éboulis au mont Hog's Back (anomalies thermiques, présence de givre), cette circulation d'air interne semble s'arrêter ou s'atténuer considérablement en période hivernale. Les températures enregistrées par les capteurs thermiques dans les sorties d'air chaud montrent effectivement une stagnation de la température à 0 °C à partir de janvier. Ces résultats concordent avec les profils stratigraphiques du manteau neigeux effectués sur les talus. Ces derniers ont révélé la présence de plusieurs couches de glace, ce qui empêche une circulation verticale efficace de l'air à l'intérieur du manteau neigeux. Le mécanisme de ventilation ne semble pas suffisamment puissant pour maintenir actives sur une longue période (plusieurs mois) les trappes d'air chaud comme l'ont observé certains chercheurs sur des talus d'éboulis ventilé de haute altitude (Bernard *et al.*, 1998; Lambiel, 2006; Delaloye *et al.*, 2007; Scapozza, 2008).

Les données de température issue du secteur 4 montrent un échange d'air depuis l'intérieur du talus vers l'extérieur sur l'ensemble de l'hiver. Tel que rapporté par Delaloye et Lambiel (2005), des échanges d'air peuvent être observés même en présence d'un manteau neigeux épais. Les échanges d'air peuvent s'effectuer au travers la neige, si les conditions sont adéquates, ou suite à la fonte du manteau neigeux liée à l'expulsion d'air chaud, lorsque celle-ci est suffisamment puissante. Un seul capteur a cependant résisté aux conditions climatiques dans ce secteur.

En régime estival, lorsque l'air ambiant est plus chaud que l'air à l'intérieur du talus d'éboulis, un écoulement gravitaire de l'air froid va se produire dans l'éboulis (Delaloye et Lambiel, 2005; Delayoye *et al.*, 2007; Morard 2011). On observe alors des sorties d'air froid à la base du talus, comme celles enregistrées dans le secteur 1, où des températures fraîches se sont maintenues tout l'été.

Un dépôt de cailloux, dont les clastes sont d'ordre décimétrique, se trouve en surface du talus d'éboulis au mont Hog's Back. Sous celui-ci, un till compact est présent. Vu la granulométrie et la compacité du dépôt, une circulation d'air n'est pas envisageable dans le till (Delaloye *et al.*, 2007) limitant la ventilation au dépôt de surface. Les résultats montrent un dépôt d'éboulis plus épais dans la partie nord ( $\pm 4,5$  m), là où les résurgences d'air chaud ont été observées dans le haut du talus. Ces données supposent que le courant d'air est probablement favorisé par l'épaisseur du dépôt granulaire de surface. Quant à l'amplitude amont-aval du processus de ventilation, celui-ci semble être restreint par la végétation dans la partie aval. Contrairement à la portion amont, le dépôt poreux dans ce secteur est suffisamment épais pour permettre une ventilation ( $\pm 6,0$  m), mais le couvert végétal dense, composé d'arbustes, empêche toute possibilité d'échange d'air.

Lors du régime hivernal (air ascendant), les fumigènes utilisés à la base du talus n'ont pas permis de déterminer le temps de résidence d'une particulaire d'air dans le talus. Aucun signe de résurgence de la fumée n'a été observé à la surface du talus, long de 65 m et ce, après une attente de 45 minutes. Ce qui laisse supposer deux possibilités, soit : 1) le temps de résidence d'une particule d'air dans le talus est supérieur à 45 minutes; 2) le volume de fumée était insuffisant pour combler l'espace occupé par l'air dans le talus d'éboulis, favorisant ainsi sa dissipation. Bien que la première hypothèse nous semble plus plausible, il est très difficile de déterminer le volume d'air que peuvent contenir les interstices du dépôt. De ce fait, la granulométrie du dépôt de surface et l'épaisseur de celui-ci nous laissent ainsi penser à une dissipation de la fumée.

Le processus de ventilation observé au mont Hog's Back est moins fort que ceux étudiés dans les Alpes suisses (Lambiel, 2006; Delaloye *et al.*, 2007; Morard, 2011), notamment en ce qui concerne le régime hivernal, où l'on observe une diminution de la puissance de ventilation au début de l'hiver et un arrêt complet dès janvier. La taille des matériaux ainsi que l'épaisseur du dépôt sont amplement suffisantes pour fournir un système de ventilation efficace (Delaloye *et al.*, 2007). Cependant, des facteurs comme le dénivelé, la déclivité, l'altitude et les conditions locales pourraient expliquer cette amplitude plus faible de la ventilation interne au mont Hog's Back. En effet, les éboulis ventilés étudiés dans les Alpes suisses (Delaloye et Lambiel, 2005; Lambiel, 2006; Delaloye *et al.*, 2007; Dorthe et Morard, 2007) sont situés sur des versants raides de plus d'une centaine de mètres de longueur et ce, à haute altitude. Au mont Hog's Back, le talus se caractérise par une pente de 35°, une longueur de 65 m, conférant ainsi un faible gradient thermique entre le bas et le haut du talus. On convient de mentionner ici que l'appel d'air associé à l'effet cheminée est d'autant plus fort que la différence thermique est élevée et que le dénivelé entre les deux entrées est important (Ruzicka, 1999; Delaloye *et al.*, 2007; Morard, 2011).

### 5.3. Impacts mutuels du processus de ventilation sur l'environnement

Les études précédentes au mont Hog's Back font mention des avalanches comme processus géomorphologique dominant sur la structure actuelle de la végétation (Boucher *et al.*, 2003; Germain *et al.*, 2009). Cependant, la présence des avalanches et l'accumulation de neige apportée par celles-ci ne peuvent expliquer à elles seules la présence de mousse d'une épaisseur de 80 cm sur un terrain poreux d'une aussi grande ampleur, soit plus de 6,0 m d'épaisseur dans le secteur aval du talus d'éboulis. La présence d'un système de ventilation hypogée a pu jouer un rôle déterminant sur la distribution et la colonisation du milieu environnant. En effet, l'apport constant d'humidité à la base de talus lors du régime estival permet le développement d'une végétation basse composée de mousses (Delaloye *et al.*, 2007). Une des caractéristiques marquantes des sorties d'air froid sur le talus (secteur 1) consiste justement à un recouvrement quasi complet du sol par une mousse atypique de la région. Bien que probablement moins efficace considérant les températures extérieures plus froides, le régime hivernal ascendant permet de fournir une quantité importante d'humidité pour soutenir le développement de mousses (givre observé au début décembre près des sorties d'air chaud, section 4.2). Au fil du temps, l'accumulation de mousses et le développement de la végétation en amont et en aval du talus, aux endroits de sorties d'air, a probablement limité le processus de ventilation en restreignant les échanges d'air entre l'intérieur du talus et l'extérieur. Ce phénomène aurait contribué à fermer le paysage forestier du mont Hog's Back et ainsi produire une rétroaction en diminuant le processus de ventilation. Cette rétroaction pourrait notamment expliquer la disposition particulière de la végétation, en « bandes parallèles » sur le flanc est de la montagne, lesquelles se seraient développées dans la partie inférieure et supérieure du talus d'éboulis (figure 5.1). Une



recherche plus exhaustive sur l'ensemble du flanc du mont Hog's Back est souhaitable à cet égard.

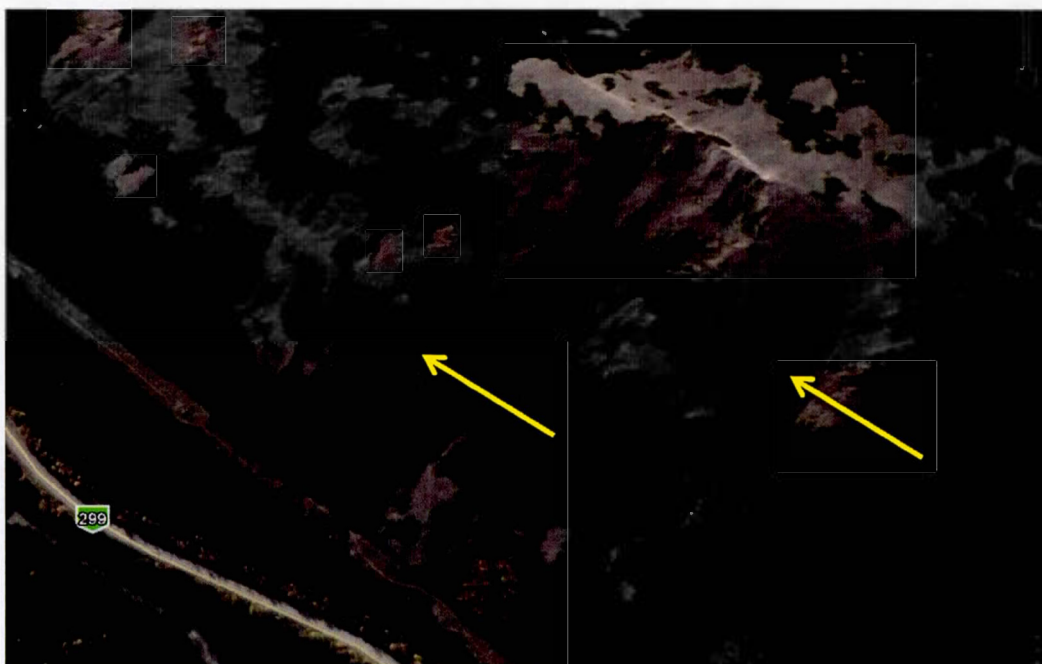


Figure 5.1 Disposition en bande de la végétation sur le flanc est du mont Hog's Back (image Google Map 2015).

La mise en place du talus d'éboulis via les mouvements gravitaires, notamment les avalanches de neige, apparait ici comme un prérequis à la formation d'un système de ventilation interne. Bien que les avalanches de neige n'aient plus d'impact géomorphologique depuis approximativement 1000 ans (Germain, 2005), elles transportent néanmoins de grandes quantités de neige depuis le haut vers la base du versant avec une probabilité d'occurrence avoisinant les 0,33 pour les événements de forte amplitude (Boucher *et al.*, 2003; Germain *et al.*, 2009). Il semble donc que ce soit l'impact conjugué des avalanches de neige et la ventilation hypogée qui aient formé le paysage forestier d'aujourd'hui sur le flanc est du mont Hog's Back.



La présence d'arbustes le long du talus semble aussi ajouter à l'impact « négatif » de la végétation sur le processus de ventilation. En hiver, des cheminées d'air à travers le manteau neigeux ont été observées le long de certains arbustes. Ces cheminées d'air étaient recouvertes de givre pouvant facilement être distingué de la neige. Ce phénomène s'explique simplement par la perte de chaleur du sol et la congélation subséquente de l'humidité de l'air sur les arbres et le manteau neigeux aux abords des trous d'aération. Cela contribue à refroidir plus rapidement la masse d'air interne du talus et à « fractionner » les sorties d'air, limitant ainsi l'amplitude du phénomène de ventilation. Ce phénomène, très peu étudié dans la littérature, pourrait avoir un impact notable sur le mécanisme de ventilation des talus d'éboulis en milieu forestier.

De nombreux auteurs mentionnent une présence diversifiée et azonale de la végétation à la base des talus ventilés (Bertinelli *et al.*, 1993; Delaloye *et al.*, 2007; Morard, 2011). Cependant, une telle diversité n'a pas été observée au mont Hog's Back, ce qui pourrait s'expliquer par la présence d'un couloir d'avalanche qui joue un rôle dominant sur la végétation (Boucher *et al.*, 2003; Germain et Fortin, 2011) et par la faible ventilation.

#### 5.4. Méthodologie, mesures de terrain et limitation

Les méthodes utilisées dans le cadre de notre étude nous ont permis d'atteindre nos objectifs. Le GPR utilisé le long de trois transects à la surface du talus d'éboulis nous a permis de déterminer la profondeur des dépôts en place. Cet instrument est souvent utilisé dans la littérature pour étudier le sous-sol des dépôts poreux tels des talus d'éboulis et des glaciers rocheux (Haeberli, 1985; Reynard *et al.*, 1999; Monnier *et al.*, 2009; Morard, 2011; Ramelli *et al.*, 2011). Le couplage des données du GPR avec une coupe stratigraphique nous a permis de déterminer les particularités des dépôts

détectés avec une plus grande précision. En effet, les dépôts en place étant de différentes natures (roche en place, till et éboulis), la réception des impulsions par l'antenne du GPR risque ainsi d'être influencée et pourrait altérer les mesures de profondeur. L'interprétation des données est donc parfois hasardeuse et c'est d'ailleurs pourquoi plusieurs auteurs suggèrent de combiner différentes méthodes géoélectriques (tomographie de résistivité électrique, tomographie de sismique réfraction, GPR) (Haeberli, 1985; Monnier *et al.*, 2009; Delaloye *et al.*, 2007; Scapozza, 2008; Morard, 2011; Ramelli *et al.*, 2011).

La mesure de la température du sol en continu est une méthode largement répandue pour étudier la ventilation interne des talus d'éboulis (Hoelzle *et al.*, 1999; Delaloye, 2004; Delaloye et Lambiel, 2005; Dorthe et Morard, 2007; Scapozza *et al.*, 2008; Morard, 2011). Le matériel utilisé dans le cadre de notre étude (I-Button) nous a permis de récolter des données précises sur une longue période. Cependant, près du tiers des capteurs installés à la surface du sol n'ont pas résisté aux intempéries extérieures et n'ont ainsi fourni aucune donnée. Ces données auraient grandement contribué à notre recherche, notamment dans le secteur 4 où un seul capteur a fonctionné pour une période de 6 mois. Des capteurs plus robustes devraient être utilisés à l'avenir lors d'étude sous des conditions climatiques difficiles comme l'on retrouve dans les Chic-Chocs.

## CONCLUSION

Cette étude a mis en évidence la complexité du processus de ventilation hypogée dans les talus d'éboulis du mont Hog's Back. Les trois objectifs de l'étude ont été atteints, à savoir la caractérisation d'un point de vue géomorphologique et sédimentologique des talus d'éboulis, la quantification dans le temps et l'espace des anomalies thermiques à la surface du sol et, enfin, l'évaluation des impacts de ces anomalies thermiques sur la végétation et vice-versa. Les résultats permettent une meilleure compréhension du processus de ventilation interne d'un talus d'éboulis en milieu forestier. Ce mémoire apporte ainsi une contribution à la littérature scientifique quant aux mécanismes internes de circulation d'air d'un talus d'éboulis de basse altitude et aux méthodes utilisées devant être adaptées au climat de montagne.

La ventilation interne d'un talus d'éboulis se manifeste par des anomalies thermiques visibles localisées dans sa partie basse en été et dans sa partie haute en hiver. La puissance de ventilation interne est fonction de plusieurs caractéristiques environnementales, mais la taille grossière des sédiments, l'épaisseur du dépôt et le gradient thermique entre l'intérieur et l'extérieur du talus sont les paramètres influençant le plus la circulation d'air.

Dans une perspective future, il serait intéressant de procéder à des relevés du manteau neigeux plus fréquemment afin de recouper ses propriétés avec les mesures de température en continu. Ainsi, nous pourrions déterminer à quel moment et quelles sont les conditions nécessaires à l'arrêt de la circulation d'air entre le talus d'éboulis et l'extérieur. Des relevés sur l'ensemble du versant au mont Hog's Back contribueraient certainement à une meilleure compréhension des processus

influençant la répartition de la végétation sur la montagne, tout en permettant de vérifier et valider la présence d'une ventilation interne. À cet effet, un suivi sur quelques années serait souhaitable afin de quantifier le fonctionnement selon la variabilité des saisons (p.ex. étés très chauds et hivers très froids). Enfin, les facteurs de refroidissement d'un milieu poreux sont nombreux, mais n'affectent dans la plupart des cas l'environnement que de façon secondaire. Le refroidissement des milieux sédimentaires grossiers est donc conditionnel à un système de circulation d'air à l'intérieur du dépôt, lequel est engendré par un déséquilibre thermique.

## BIBLIOGRAPHIE

- Balch, E.S. (1900). Glaciers or freezing caverns. *Philadelphia, Allen Lane et Scott*, 377 p.
- Bertinelli, F., Petitcolas, V., Asta, J., Richard, L. et Souchier, B. (1993). Relations dynamiques entre la végétation et le sol sur éboulis froid dans les alpes françaises méridionales. *Revue d'Écologie Alpine, II*, 93-104
- Boucher, D., Fillion, L. et Hétu, B. (2003). Reconstitution dendrochronologique et fréquence des grosses avalanches de neige dans un couloir subalpin du mont Hog's Back, en Gaspésie centrale (Québec). *Géographie physique et Quaternaire*, 57, 2-3, 159-168
- Brisebois, D. et Brun, J. (1994). La plate-forme du Saint-Laurent et les Appalaches. M. Hocq, édit., *Géologie du Québec. Les Publications du Québec*, MM94-01, 154 p.
- Cheng, G. (2004). Influences of local factors on permafrost occurrence and their implications for Qinghai-Xizang Railway design. *Science China Earth Sciences*, 47, 704-709
- Delaloye, R. et Lambiel, C. (2005). Evidence of winter ascending air circulation throughout talus slopes and rock glaciers situated in the lower belt of alpine discontinuous permafrost (Swiss Alps). *Norsk Geografisk Tidsskrift*, 59, 194-203
- Delaloye, R. (2004). Contribution à l'étude du pergélisol de montagne en zone marginale. *Université de Fribourg*, 240 p.
- Delaloye, R., Dorthe, J. et Morard, S. (2007). Effets de la ventilation des éboulis froids et des glaciers rocheux fossiles dans les Préalpes suisses romandes. *Université de Fribourg*, 166 p.
- Delaloye, R. et Monbaron, M. (2003). Snow effects on recent shifts (1998-2002) in mean annual ground surface temperature at alpine permafrost sites in the western Swiss Alps. *8e International Conference on Permafrost, Zurich, Extended abstracts volume*, 23-24



- Desaussure, H. (1796). Voyages dans les Alpes, précédés d'un essai sur l'histoire naturelle des environs de Genève. *Tome troisième, Neuchâtel, S. Fauche*. Consulté le 15 septembre 2012 de <http://gallica.bnf.fr/>
- D'Hulst, A. (2007). Métallogénie des gîtes dévoniens du dôme de Lemieux et de Sainte-Marguerite, Gaspésie, Québec, Canada. *Thèse de doctorat, Université Laval*, 154 p.
- Doyon, M. et Valiquette, G. (1991). Roches magmatiques du centre-nord de la Gaspésie. *Ministère de l'Énergie et des Ressources, Québec, Rapport ET 90-03*, 69 p.
- Dorthe, J. et Morard, S. (2007). Effet de la ventilation des éboulis froids et des glaciers rocheux fossiles dans les Préalpes suisses romandes. *Université de Fribourg*, 166 p.
- Esch, C. D. (1987). Insulation Performance Beneath Roads and Airfields in Alaska. *Transportation Research Record*, No. 1146. 23-27
- Farbrot, H., Isaksen, K. et Etzelmüller, B. (2008). Present and past distribution of mountain permafrost in the Gaissane mountains, Northern Norway. *Ninth International Conference on Permafrost*, 427-432
- Francou, B. et Hétu, B. (1989). Éboulis et autres formations de pente hétérométrique. *Régionalisation du Périglaciaire*, fasc. XI, 11-69
- Francou, B. et Manté, C. (1990). Analysis of the segmentation on the profile of alpine talus slopes. *Permafrost and Periglacial Processes*, 1, 53 -60
- Francou, B. (1991). Pentes, granulométrie et mobilité des matériaux le long d'un talus d'éboulis en milieu alpin. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2, 175-186
- Gagnon, R.M. (1970). Climat des Chic-Chocs. *Ministère des Richesses naturelles, Québec*, MP 36, 103 p.
- Germain, D. (2005). Dynamique des avalanches de neige en Gaspésie, Québec, Canada. *Thèse de doctorat, Université Laval, Québec*, 172 p.

- Germain, D., Filion, L. et Hétu, B. (2009). Snow avalanche Regime and climatic conditions in the Chic-Choc Range, eastern Canada. *Climatic Change*, 92, 141-167
- Germain, D. et Fortin, G. (2011). Impacts of climate change on vegetation and geomorphologic hazards in the Chic-Chocs Range, eastern Canada. *Proceedings of the International Geographic Union, Santiago Chile, 14-18th November 2011*.
- Gisnås, K. (2011). Modelling of permafrost in Norway using two equilibrium models. *Masteroppgave, University of Oslo*, 111 p.
- Goering, D.J. (1998). Experimental investigation of air convection embankments for permafrost-resistant roadway design. *Seventh International Conference on Permafrost. Collection Nordicana*, 57. Yellowknife, NWT, Canada, 319-326
- Gray, J.T. et Brown, R.J.E. (1979). Permafrost presence and distribution in the Chic-Chocs Mountains, Gaspésie, Québec. *Géographie physique et Quaternaire* 33, 299-316
- Gray, J.T. et Brown, R.J.E. (1982). The influence of terrain factors on the distribution of permafrost bodies in the Chic-Chocs Mountains, Gaspésie, Québec. *4th Canadian Permafrost Conference, National Research Council of Canada, Ottawa*, 171 p.
- Gray, J.T., Godin, E., Masse, J. et Fortier, D., (2009). Trois décennies d'observation des fluctuations du régime thermique du pergélisol dans le parc national de la Gaspésie. *Le Naturaliste Canadien*, 133, 69-77
- Gruber, S. (2005). Mountain permafrost : transient spatial modelling, model verification and the use of remote sensing. *University of Zurich*, 121 p..
- Gruber, S. et Hoelzle, M. (2008). The cooling effect of coarse blocks revisited: a modeling study of a purely conductive mechanism. *9th International Conference on Permafrost, Fairbanks, Alaska*, 1, 557-561.
- Guodong, C., Yuanming, L., Zhizhong, S. et Fan, J. (2007). The Thermal Semi-Conductor Effect of Crushed Rocks. *Permafrost and Periglacial Processes*, 18, 151-160

- Harris, S. et Pedersen, D. (1998). Thermal regimes beneath coarse blocky materials. *Permafrost and Periglacial Processes*, 9, 107-120
- Harris, C., Arenson, L.U., Christiansen, H.H., Etzelmüller, B., Frauenfelder, R., Gruber, S., Haeberli, W., Hauck, C., Hölzle, M., Humlum, O., Isaksen, K., Kääb, A., Kern-Lütschg, M.A., Lehning, M., Matsuoka, N., Murton, J.B., Nötzli, J., Phillips, M., Ross, N., Seppälä, M., Springman, S.M. et Vonder Mühll, D (2009). Permafrost and climate in Europe: monitoring and modelling thermal, geomorphological and geotechnical responses. *Earth-Science Reviews*, 92, 117-171
- Haeberli, W. (1985). Creep of Mountain Permafrost: Internal Structure and Flow of Alpine Rock Glaciers. *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie ETH Zürich* 77, 1-142
- Hoelzle, M. et Haeberli, W. (1995). Simulating the effects of mean annual air-temperature changes on permafrost distribution and glacier size: an example from the Upper Engadin, Swiss Alps. *Annals of Glaciology*, 21, 399-405
- Hoelzle, M., Wegmann, M. et Krummenacher, B. (1999). Miniature temperature dataloggers for mapping and monitoring of permafrost in high mountain areas: First experience from the Swiss Alps. *Permafrost and Periglacial Processes*, 10, 113-124
- Hoelzle, M., Mittaz, C., Etzelmüller, B. et Haeberli, W. (2001). Surface energy fluxes and distribution models of permafrost in European Mountain area: an overview of current developments. *Permafrost and Periglacial Processes*, 12, 53-68
- Hoelzle, M., Hauck, C., Scherler, M., Schneider, S., Bircher, S. et Panz, M. (2010). Active layer processes on rock glacier Murtèl-Corvatsch. *Third Europe Conference Permafrost., Longyearbyen, Svalbard*, 326 p.
- Lai, Y., Zhang L., Zhang S. et MI, L. (2003). The cooling effect of ripped-stone embankments on Qinghai-Tibet railway under climatic warming. *Chinese Science Bulletin* 48, 6, 598-604
- Lai, Y., Ma, W., Zhang, M., Yu, W. et Gao, Z. (2006). Experimental investigation on influence of boundary conditions on cooling effect and mechanism of crushed-rock layer. *Cold Regions Science and Technology*, 45, 2, 114-121
- Lambiel, C. (2006). Le pergélisol dans les terrains sédimentaires à forte déclivité : distribution, régime thermique et instabilités. *Université de Lausanne*, 260 p.

- Law, J. et Vandijk, D. (1994). Sublimation as a geomorphic process: a review. *Permafrost and Periglacial Processes*, 5, 237-249
- Lilleøren, K., Etzelmüller, B., Schuler, T., Gislén, K. et Humlum, O. (2012). The relative age of mountain permafrost: estimation of Holocene permafrost limits in Norway. *Global and Planetary Change*, 92-93, 209-223
- Lismonde, B. (2001). L'âne de Buridan, le principe de Curie et l'effet de cheminée. *Courants d'air dans les cavités en forme de U. Karstologia*, 37/1, 23-28
- Lismonde, B. (2002a). Climatologie du monde souterrain: vents des ténèbres. *Comité Départemental de Spéléologie de l'Isère*, tome 1, 168 p.
- Lismonde, B. (2002b). Climatologie du monde souterrain: aérologie des systèmes karstiques. *Comité Départemental de Spéléologie de l'Isère*, tome 2, 362 p.
- Luetscher, M., Jeannin, P.-Y. et Haeberli, W. (2003). Energy fluxes in an cave of sporadic permafrost in the Swiss Jura mountains-concept and first observational results. *Permafrost, Philipps, Springman et Arenson (eds), Swets et Zeitlinger*, 691-696
- Luetscher, M. et Jeannin, P.-Y. (2004a). Temperature distribution in karst systems : the role of air and water fluxes. *Terra Nova* 16, 344-350
- Luetscher, M. et Jeannin, P.-Y. (2004b). The role of winter air circulations for the presence of subsurface ice accumulations : an example from Monlési ice cave (Switzerland). *Theoretical and Applied Karstology*, 17, 19-25
- Massen, F., Duser, M., Loy, W. et Vandenberghe, N. (1998). Cave volume computed on the behavior of a blowing well (Tournai basin, W. Belgium). *Terra Nova*, 10, 131-135
- Monnier, S., Camerlynck, C. et Rejiba, F. (2009). Ground-penetrating radar surveys on rock glaciers in the Vanoise Massif. *Géomorphologie : relief, processus environnemental*, 2, 3597-3626
- Morard, S. (2011). Effets de la circulation d'air par effet de cheminée dans l'évolution du régime thermique des éboulis froids de basse et moyenne altitude. *Université de Fribourg*, 220 p.



- Pérez, F. (1998). Talus fabric, clast morphology, and botanical Indicators of Slope Processes on the Chaos Crags (California Cascades), U.S.A. *Géographie physique et Quaternaire*, 52, 1, 47-68
- Ramelli, G., Scapozza, C., Mari, S. et Lambiel, C. (2011). Structure interne et dynamique des glaciers rocheux du massif de la Cima di Gana Bianca, Val Blenio (Tessin). *Université de Lausanne*, 193 p.
- Reckard, M. (1985). White paint for highway thaw settlement control. *Interium report, n° FHWA-AK-RD-85-16, Federal Highway Administration, Washington, DC*.
- Reynard, E., Delaloye, R. et Lambiel, C. (1999). Prospection géoélectrique du pergélisol alpin dans le massif des Diablerets et au Mont Gelé. *Bulletin de la Murithienne*, 89-103
- Sawada, Y. (2003). Monitoring of ground-ice formation in a block slope at Mt. NishiNupukaushinupuri, Hokkaido, Japan. *Permafrost, Philipps, Springman et Arenson, Swets et Zeitlinger*, 1001-1005
- Sawada, Y. (2008). Origin and Age of Perennial Ice Within a Block Slope in the Shikaribestu Mountains, Hokkaido, Japan. *Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost, Fairbanks, Alaska*, 1577-1582
- Scapozza, C. (2008). Contribution à l'étude géomorphologique et géophysique des environnements périglaciaires des Alpes Tessinoises orientales. *Université de Lausanne*, 286 p.
- Scapozza, C., Lambiel, C. et Reynard, E. (2008). Glaciers rocheux et distribution régionale du pergélisol discontinu dans les Alpes Tessinoises orientales (Suisse). *Rothenbühler, C., Klimaveränderungen auf der Spur*, 79-92
- Scapozza, C. et Lambiel, C. (2012). Structure interne et répartition du pergélisol dans l'éboulis «à galets» de Tsaté-Moiry (VS). *Bewegung Jahrestagung der Schweizerischen Geomorphologischen Gesellschaft, St. Niklaus, Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt WSL*, 33-45



- Smithson, P.A. (1991). Inter-relationships between cave and outside air temperatures. *Theoretical and Applied Climatology*, 44, 1, 65-73
- Vinson, T. (2005). Mitigation options to reduce icing and thaw instability problems on the Denali Park (Alaska) access road. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 27, 1, 17- 32
- Zhang M., Lai Y., Liu Z. et Gao Z. (2005). Nonlinear analysis for the cooling effect of Qinghai–Tibetan Railway embankment with different structures in permafrost regions. *Cold Regions Science Technology*, vol. 42, 3, 237-249